



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KONSTRUKČNÍ NÁVRH ADSORBÉRU

DESIGN OF ADSORBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JOSEF ŠTĚPÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. TOMÁŠ LÉTAL

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Štěpánek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukční návrh adsorbéru

v anglickém jazyce:

Design of adsorber

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na návrh zařízení pro separaci. Součástí práce bude konstrukční návrh založený na specifikaci zařízení a pevnostním výpočtu. Detailní pevnostní výpočty budou provedeny dle MKP.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Rozbor specifikace zařízení.
3. Konstrukční návrh zařízení.
4. Návrhový výpočet zařízení dle normy ČSN EN 13 445.
5. Kontrola některých částí pomocí MKP.
6. Tvorba základní výkresové dokumentace.

Seznam odborné literatury:

- [1] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999.
- [2] ČSN EN 13 445 – Netopené tlakové nádoby.
- [3] Křupka, V.: Výpočet válcových tenkostěnných kovových nádob a potrubí, SNTL, Praha 1967.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Létal

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavní náplní diplomové práce je návrh konstrukce a pevnostní výpočet adsorbéru. Výpočet je proveden podle normy ČSN EN 13 445. V první části je řešena problematika adsorbérů. Dále je provedena pevnostní analýza pomocí metody konečných prvků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Adsorbér

Tlaková nádoba

Pevnostní výpočet

MKP

ČSN EN 13 445

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on design of adsorber. Rule ČSN EN 13 445 is used to calculate of design of adsorber. Finite element method (FEM) is used for stress analysis a categorization of the stress.

KEYWORDS

Adsorber

Pressure vessel

Stress analysis

FEM

CSN EN 13 445

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTĚPÁNEK, J . Konstrukční návrh adsorbéru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 84 s . Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Létal.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, na základě uvedené literatury a podkladů pod vedením vedoucího práce Ing. Tomáše Létala.

V Brně 27. května 2014

.....

Bc. Josef Štěpánek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu této diplomové práce Ing. Tomáši Létalovi, za poskytnuté rady a cenné připomínky. Dále děkuji rodičům za podporu při studiu a poskytnutí finančního zázemí.

SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Popis	Jednotka
δ_b	Rozteč šroubů na přírubě	mm
δ_e	Absolutní hodnota možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce	mm
$\sigma_{H,m}$	Podélné napětí v krku pro montážní podmínky - provoz	MPa
$\sigma_{H,p}$	Podélné napětí v krku pro provozní podmínky - provoz	MPa
$\sigma_{H.test,m}$	Podélné napětí v krku pro montážní podmínky – tlaková zk.	MPa
$\sigma_{H.test,p}$	Podélné napětí v krku pro provozní podmínky - tlaková zk.	MPa
$\sigma_{r,m}$	Radiální napětí v přírubě pro montážní podmínky - provoz	MPa
$\sigma_{r,p}$	Radiální napětí v přírubě pro provozní podmínky - provoz	MPa
$\sigma_{r.test,m}$	Radiální napětí v přírubě pro montážní podmínky - tlaková zk.	MPa
$\sigma_{r.test,p}$	Radiální napětí v přírubě pro provozní podmínky - tlaková zk.	MPa
$\sigma_{\theta,m}$	Tangenciální napětí v přírubě pro montážní podmínky -provoz	MPa
$\sigma_{\theta,p}$	Tangenciální napětí v přírubě pro provozní podmínky -provoz	MPa
$\sigma_{\theta.test,m}$	Tangenciální napětí v přírubě pro montážní podmínky - tlaková zk.	MPa
$\sigma_{\theta.test,p}$	Tangenciální napětí v přírubě pro provozní podmínky - tlaková zk.	MPa
A	Vnější průměr příruby	mm
A_{fb}	Nosná plocha příčného průřezu hrdla účinná pro vyztužení	mm ²
A_{fs}	Nosná plocha příčného průřezu skořepiny účinná pro vyztužení	mm ²
A_{pb}	Plocha hrdla zatížená tlakem	mm ²
A_{ps}	Plocha skořepiny zatížená tlakem	mm ²
A_s	Nosná plocha průřezu šroubu	mm ²
B	Vnitřní průměr příruby	mm
C	Průměr roztečné kružnice šroubů	mm
c	Přídavek na korozi	mm
d_b	Průměr otvoru pro šroub	mm
D_e	Vnější průměr skořepiny	mm
d_{eb}	Vnější průměr hrdla ve skořepině	mm
D_i	Vnitřní průměr skořepiny	mm

d_{ib}	Vnitřní průměr hrdla ve skořepině	mm
D_m	Střední průměr skořepiny pro provoz	mm
$D_{m,test}$	Střední průměr skořepiny pro test	mm
d_n	Jmenovitý průměr šroubu	mm
D_z	Střední poloměr podstavce	mm
e	Minimální tloušťka stěny při provozu	mm
e_a	Analyzovaná tloušťka stěny	mm
$e_{a,d}$	Analyzovaná tloušťka stěny dna	mm
$e_{b,h}$	Tloušťka stěny hrdla	mm
$e_{c,s}$	Předpokládaná tloušťka stěny skořepiny	mm
e_n	Jmenovitá tloušťka stěny	mm
e_p	Minimální tloušťka příruby	mm
f_B	Dovolené namáhání šroubů při provozní teplotě	MPa
f_b	Výpočtové napětí plastického boulení - provoz	MPa
$f_{B,A}$	Dovolené namáhání šroubů při provozní teplotě	MPa
$f_{b,test}$	Výpočtové napětí plastického boulení - test	MPa
f_d	Dovolené napětí při provozu	MPa
f_{test}	Dovolené napětí při zkoušce	MPa
G	Průměr působíště reakční síly v těsnění	mm
g_0	Tloušťka krku u spojení s pláštěm	mm
g_1	Tloušťka krku u spojení s listem příruby	mm
h_i	Vnitřní výška dna	mm
h_p	Délka krku příruby	mm
l_b	Délka vnější části hrdla	mm
l_s	Délka skořepiny mezi okrajem otvoru a skořepinovou diskontinuitou	mm
l_{so}	Maximální vyztužující délka skořepiny	mm
m	Součinitel těsnění	-
n_s	Počet šroubů	-
P	Provozní tlak	MPa
$P_{d,max}$	Maximální tlak pro dno při provozu	MPa
$P_{d,max,test}$	Maximální tlak pro dno při zkoušce	MPa
$P_{h,max}$	Maximální dovolený tlak hrdla pro provozní podmínky	MPa
$P_{h,max,test}$	Maximální dovolený tlak hrdla pro testovací podmínky	MPa
$P_{h2,max}$	Maximální dovolený tlak pro provozní podmínky	MPa
$P_{h2,max,test}$	Maximální dovolený tlak pro testovací podmínky	MPa
P_{max}	Maximální tlak při provozu	MPa
P_{test}	Zkušební tlak	MPa

r	Vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu	mm
R	Vnitřní poloměr kulové střední části dna	mm
t_{20}	Teplota 20°C	°C
t_{TZ}	Teplota při tlakové zkoušce	°C
w	Styková šířka těsnění	mm
y	Minimální měrný tlak	MPa
z	Svarový součinitel	-
β	Součinitel tvaru - návrh	-
β_{un}	Součinitel tvaru - únosnost	-

OBSAH

Seznam symbolů	8
obsah	11
Úvod.....	14
1 Adsorbéry	15
1.1 Popis fyzikální podstaty adsorpce.....	15
1.2 Regenerace adsorbentů.....	17
1.2.1 Technické řešení desorpce	18
1.3 Adsorbenty	20
1.3.1 Adsorbenty používané v průmyslové praxi	20
1.4 Konstrukční řešení adsorbérů.....	24
1.4.1Rozdělení adsorbérů podle druhu lože.....	24
1.4.2 Rozdělení adsorbérů podle umístění lože	27
2 Pevnostní výpočet podle ČSN EN 13445 – 3	28
2.1 Zadaná vstupní data.....	28
2.2 Dovolené napětí	29
2.3 Zkušební tlak a svarový součinitel	30
2.3 Válcová skořepina.....	31
2.4 Torosférická dna.....	33
2.5 Otvory ve válcovém plášti a torosférickém dnu.....	37
2.5.1 Otvory v torosférickém dně	37

2.5.2 Otvory ve válcovém plášti	40
2.6 Příruby	45
2.6.1 Příruby na hrdlech	45
2.6.2 Plášťová příruba	46
2.7 Válcový podstavec	54
3 Pevnostní kontrola pomocí MKP	63
3.1 Metoda konečných prvků	63
3.2 Výpočet plošného modelu adsorbéru	64
3.2.1 Model	64
3.2.2 Tvorba sítě	65
3.2.3 okrajové podmínky	66
3.2.4 Výsledky výpočtu	68
3.3 Detailní výpočet dna s hrdlem	70
3.3.1 Model	70
3.3.2 Tvorba sítě	71
3.3.3 Okrajové podmínky	71
3.3.4 Výsledky výpočtu	73
Závěr	78
Seznam použitých zdrojů	79
Seznam Obrázků	81
Seznam tabulek	83

Seznam Příloh	84
---------------------	----

ÚVOD

Adsorbér je zařízení sloužící k odstraňování nežádoucích složek z požadovaného média. K samotnému zachycení dochází na absorbentu. Adsorpci lze rozdělit do dvou skupin:

- Fyzikální adsorpce

Probíhá díky působení slabých van der Waalsových sil na fázovém rozhraní tekutiny a pevné látky. Adsorpční proces je závislý na tlaku, chemickém složení a teplotě. Se vzrůstající teplotou klesá schopnost adsorbentu pohlcovat nežádoucí plyny.

- Chemisorpce

Adsorbent a pohlcovaná látka vytvoří chemickou vazbu. Adsorbent se zpravidla nedá změnou tlaku nebo teploty regenerovat.

V technické praxi jsou adsorbéry nejčastěji konstruovány jako válcové tlakové nádoby s torosférickými dny. Tímto typem se zabývá i tato diplomová práce. [1]

1 ADSORBÉRY

1.1 POPIS FYZIKÁLNÍ PODSTATY ADSORPCE

Princip adsorpce spočívá v zachycování plynné fáze ze směsi plynů nebo rozpuštěné látky v kapalině na povrchu pevné látky. Zachycování na pevném povrchu probíhá působením mezipovrchových přitažlivých sil. [2][3]

Mezipovrchové přitažlivé síly se dle principu dělí na:

- **Fyzikální adsorpce**

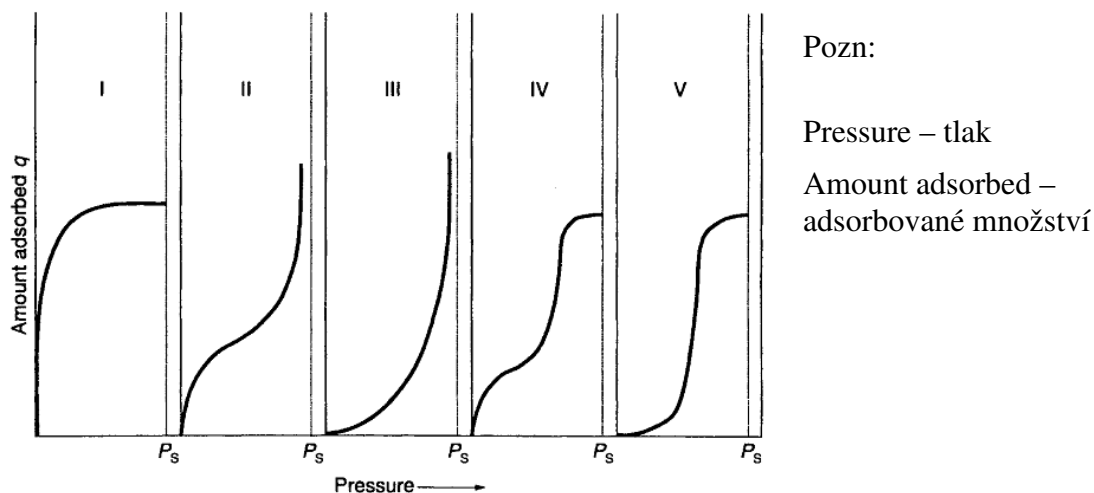
Adsorbované molekuly jsou na povrchu adsorbentu přidržovány van der Waalsovou silou.

- **Chemisorpce**

Adsorbované molekuly jsou na povrchu adsorbentu přidržovány chemickou vazbou.

Průběh adsorpce je popsán pomocí adsorpční rovnováhy. Adsorpční rovnováha vyjadřuje závislost adsorbovaného množství na koncentraci. Adsorpci za konstantního tlaku popisuje adsorpční izobara a za konstantní teploty adsorpční izoterma. [2]

Na obr. 1 je znázorněno pět možných průběhů adsorpčních izoterm. Všechny zobrazené izotermy lze pozorovat v praxi. Jednotlivé průběhy jsou popsány v následujícím textu. [4]



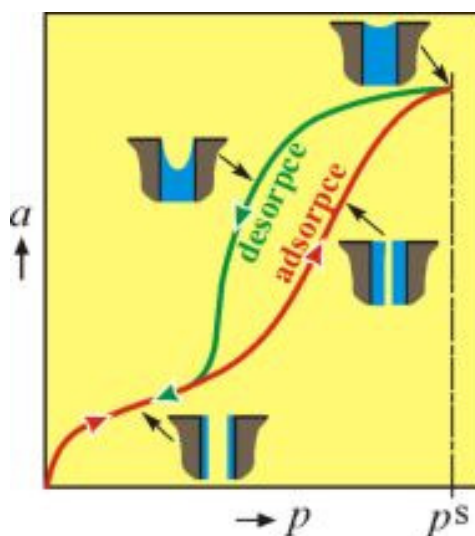
Obrázek 1 Možné průběhy adsorpčních izoterm [4]

- I. Velikost pórů adsorbentu je jen nepatrně větší než průměr zachytávaných molekul. V důsledku toho se vytvoří monovrstva. Tím se póry uzavrou a adsorpce se zastaví. Tento děj nastává při adsorpci plynů na mikroporézních pevných látkách.
- II. Od začátku děje až po první inflexní bod se zaplňuje monovrstva. Následuje adsorpce po sobě jdoucích vrstev. Tento typ průběhu vykazují absorbenty se širokou škálou velikostí pórů.
- III. Se vzrůstajícím tlakem roste i hodnota adsorpční kapacity. Tato izoterma se v průmyslové praxi objevuje zřídka.
- IV. Průběh izotermy je téměř shodný s izotermou číslo II. Rozdíl je při vyšším tlaku, kde přestane adsorpční kapacita vzrůstat.
- V. Průběh izotermy je téměř shodný s izotermou číslo III. Rozdíl je při vyšším tlaku, kde přestane adsorpční kapacita vzrůstat.

V adsorbérech probíhá adsorpce nejčastěji podle adsorpční izobary číslo I, II a IV. [4]

1.2 REGENERACE ADSORBENTŮ

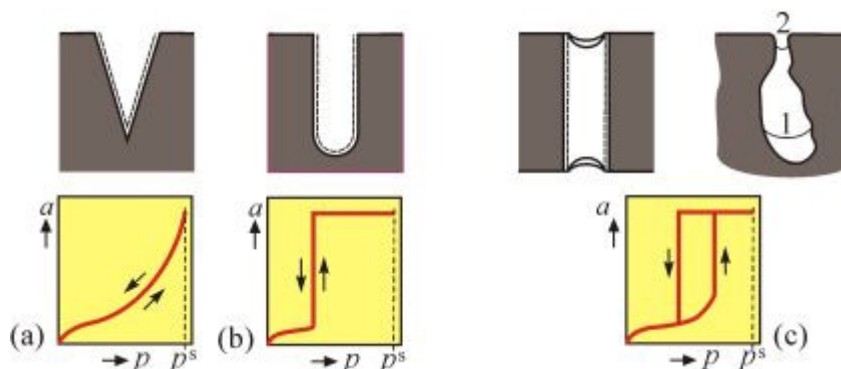
Po určitém čase provozu adsorbéru nastane doba, kdy koncentrace adsorbované složky přesáhne stanovenou hodnotu. To značí, že adsorbent potřebuje regeneraci. Při regeneraci probíhá proces nazývaný desorpce. Desorpce je opakem adsorpce. Zachycená látka na adsorbentu se uvolňuje a adsorbent je připraven k dalšímu použití. Na některých porézních adsorbentech dochází k tomu, že adsorpční izoterma má odlišný průběh při adsorpci a desorpci. Tento jev, který se nazývá adsorpční hystereze, je uveden na obr. 2. [2]



Obrázek 2 Adsorpční hystereze [2]

Adsorpční hystereze závisí na tvaru pórů adsorbentu. Při určitém tvaru pórů adsorpční hystereze nenastane.

Na obr. 3 je znázorněn průběh adsorpčních izoterem v závislosti na tvaru pórů. Izotermy označené písmeny a, b a c jsou popsány v následujícím textu. [2]



Obrázek 3 Průběh izoterem při různých tvarech pórů [2]

- U kuželového póru se začne ve vrcholu tvořit meniskus. Zkondenzovaná pára se posouvá blíže k vrcholu, což vyžaduje zvýšení tlaku. Při desorpci je průběh izotermy totožný.
- Ve válcovém uzavřeném póru se vytvoří meniskus. Zkondenzovaná pára se posouvá dále od dna póru. Jelikož se nemění průřez póru, tlak zůstává konstantní. Při desorpci je průběh izotermy totožný.
- U válcové neuzavřeného póru dochází ke kondenzaci na vnitřní stěně válce. Tloušťka kondenzátu narůstá až do té doby, kdy dojde k úplnému zaplnění. Vlivem vlastností kapaliny, vznikne u okraje póru meniskus. Desorpce začíná od povrchu menisku. Díky rozdílné geometrii jsou rozdílné také tlaky. V důsledku toho má izoterma při adsorpci a desorpci odlišný průběh.

1.2.1 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ DESORPCE

U adsorbéru se cyklicky střídá adsorpce a desorpce. Z tohoto důvodu se do procesu často umísťují dva adsorbéry. Jeden pracuje, zatímco u druhého probíhá regenerace. Díky tomuto může být plyn kontinuálně čištěn a není nutné budovat zásobníky na znečištěný plyn. Desorpce se provádí zvýšením teploty a současnou cirkulací inertního plynu. Nejčastěji je jako médium pro desorpci využívána vodní pára. Pára ohřívá adsorbent a odnáší desorbované složky. Znečištěný kondenzát se likviduje podle rozpustnosti látek ve vodě. [1]

- Látka je ve vodě nerozpustná**

Od kondenzátu se oddělí zachycená látka, která se následně vhodným způsobem zlikviduje. [1]

- **Látka je ve vodě rozpustná**

Kondenzát se rozdestiluje, čímž se oddělí voda a zachycená látka. Voda obsahuje určité množství rozpuštěného adsorbátu, proto se musí dále upravovat. Jedním ze způsobů je adsorpční oddělení v kapalně fázi vhodným sorbentem. Dále lze použít vypaření adsorbátu, kde se vznikající pára používá pro další desorpci. [1]

Další možností je provést desorpci horkým vzduchem. Tento způsob se nazývá stripování. Využívá se především tam, kde se desorbované složky likvidují spalováním. [1]

Adsorbéry bez regenerace

U některých adsorbérů je ekonomicky výhodnější desorpci vůbec neprovádět. Pokud je koncentrace znečištění nízká, vyčerpání životnosti sorbentu probíhá pomalu. Až sorbent přestane plnit funkci, tak se zlikviduje a nahradí novým. Na obr. 4 je sorbent v kazetách od společnosti Klima-Servis a.s. Tato firma nabízí možnost regenerace sorbentu na svých pracovištích, což má za následek snížení nákladů na nákup nového sorbentu. [13]



Obrázek 4 Kazety obsahující aktivní uhlí [13]

1.3 ADSORBENTY

Adsorbent je materiál, který má vhodné vlastnosti vhodné k zachycování látek na svém povrchu. Základní vlastností adsorbentu je hodnota specifického povrchu. Specifický povrch je definován jako poměr plochy povrchu a hmotnosti. Nejčastěji se udává v jednotkách m^2/g nebo m^2/kg . V průmyslovém použití se hodnota specifického povrchu pohybuje v intervalu 600 000 až 1 700 000 m^2/kg . [2]

1.3.1 ADSORBENTY POUŽÍVANÉ V PRŮMYSLVÉ PRAXI

- **Aktivní uhlí**

Vyrábí se suchou destilací z látek organického původu. Po destilaci následuje aktivace produktu. Aktivace se provádí žháním bez přístupu vzduchu a následnou oxidací vzduchem, vodní parou nebo oxidem uhličitým. Po tomto procesu je aktivní uhlí (obr. 5) zbaveno dehtových zplodin z povrchu částic. [5]



Obrázek 5 Aktivní uhlí [5]

- **Jíl**

Jíl (obr. 6) se těží z přírodních ložisek nebo lze vyrobit synteticky. Využívá se zejména pro odstraňování dusíku a olefinu. [6]



Obrázek 6 Jíl [6]

- **Silikagel**

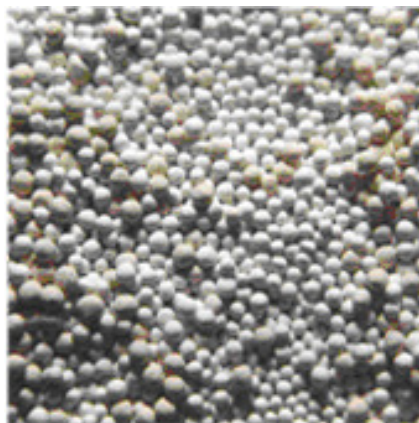
Hlavní složky pro výrobu silikagelu (obr. 7) je křemičitan sodný a kyselina sírová. Při výrobě se vytváří mikrokristaly, ve kterých jsou póry o různé velikosti. Do těchto pórů se adsorbuje nežádoucí látka. Nejčastěji se silikagel používá pro adsorpci vodní páry. Silikagel adsorbuje vodní páru, jejíž hmotnost je až polovina vlastní hmotnosti silikagelu. Díky této vlastnosti se používá především jako vysoušedlo. [8]



Obrázek 7 Silikagel [8]

- **Zeolity**

Zeolity (obr. 9) jsou porézní krystalické aluminosilikáty, které obsahují SiO_4 a AlO_4 spojeny prostřednictvím sdílení atomu kyslíku. Každý druh zeolitu má jinou velikost pórů, což umožňuje separaci podle velikosti. Díky této vlastnosti se zeolity také nazývají jako molekulární síta. V současné době je známo více než 150 druhů zeolitu. Molekulární síta se používají pro odstraňování vlhkosti z plynů a čištění technického, petrochemického a zemního plynu. [9]



Obrázek 8 Zeolity [9]

- **Oxidy kovů**

Adsorpce probíhá na základě chemické reakce. Oxidy kovů (obr. 9) se používají k odstranění propylenu, etylenu, oxidu uhelnatého, vodíku, síry, arsínu a dalších látek. [10]



Obrázek 9 Oxidy kovů [10]

- **Aktivovaný oxid hlinitý**

Aktivovaný oxid hlinitý (obr. 10) se používá především pro vysoušení teplých plynů a čištění uhlovodíkových proudů od polárních nečistot. [7]



Obrázek 10 Aktivovaný oxid hlinitý [7]

1.4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ADSORBÉRŮ

Pro vyšší provozní tlaky je adsorbér ocelová tlaková nádoba s válcovým pláštěm a hluboce klenutými dny. Při nižších tlacích se používají adsorbéry různých tvarů: krychle, kvádry a mnoha dalších. Méně namáhané konstrukce se vyrábí z plastů nebo laminátu. Pracovní tlak se pohybuje v rozmezí 0,1 – 10 MPa. [1]

Pokud zpracováváný plyn obsahuje pevné částice, je nutné provést odprášení. Tuhé částičky vstupující do adsorbéru se usazují v pórech adsorbentu, což má za následek snížení účinnosti procesu. Odprášení se provádí na keramických, textilních nebo papírových filtrech. Plyn musí mít požadovanou teplotu a vlhkost. [1] [11]

1.4.1 ROZDĚLENÍ ADSORBÉRŮ PODLE DRUHU LOŽE

- **Adsorbéry s pevným ložem**

Vrstva adsorbentu leží na pevném roštu nebo v perforovaném koši. Cílem je dosáhnout malého hydraulického odporu a velkého mezifázového povrchu. Z tohoto důvodu se adsorbent tvaruje do kuliček, dutých válečků, hrudek a dalších tvarů. Výhodou tohoto druhu adsorbéru je absence pohyblivých prvků, což má za následek nižší cenu a vyšší spolehlivost. Nevýhodou je možnost použití pouze tam, kde plyn neobsahuje žádné tuhé příměsi. [1]

Oblasti použití: [1]

a) Čištění směsi plynů

- uhlovodíky a jejich deriváty
- rozpouštědla nátěrových hmot
- vodní pára
- dioxiny, benzofurany

b) Technologické účely

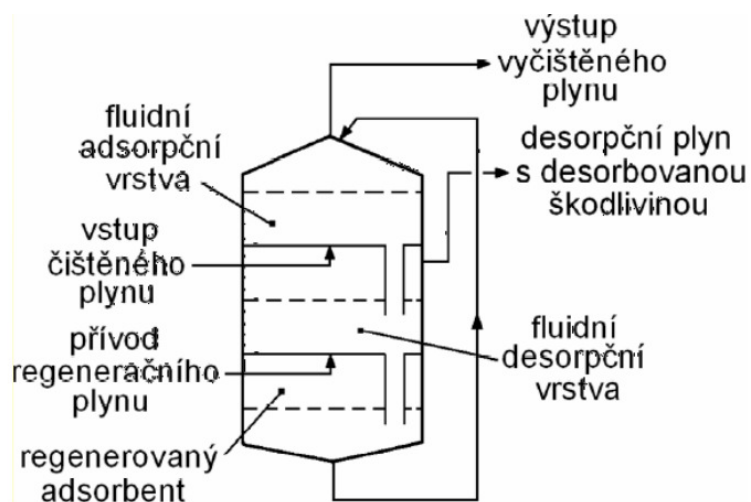
- dělení směsi uhlovodíků na složky
- dělení vzduchu na složky

- **Adsorbéry s pohyblivým ložem**

Používají se dva základní typy.

Fluidní adsorbéry

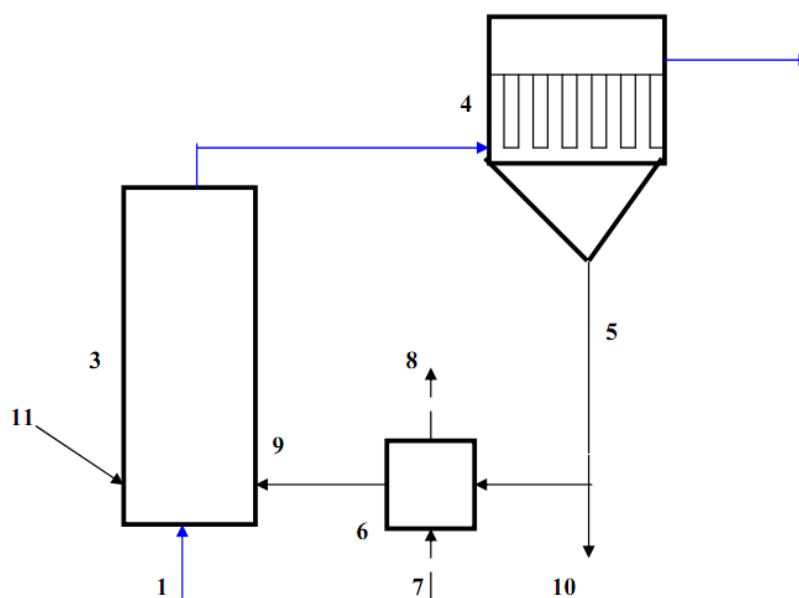
Adsorbent je udržován ve fluidní vrstvě ze spodu proudícím plynem. Výhodou je výborný kontakt adsorbentu a znečištěného plynu, díky čemuž lze volit menší rozměry adsorbéru. Adsorbent musí mít dobré mechanické vlastnosti, zejména otěruvzdornost. Adsorbent je průběžně odsáván do spodní části, regenerován a vrácen zpět do fluidní vrstvy. Schéma fluidního adsorbéru je na obr. 11. [1] [12]



Obrázek 11 Adsorbér s fluidním ložem [12]

Proudové adsorbéry

Na obrázku XY je znázorněno schéma proudového adsorbéru. Pozice 1 představuje vstup plynu do adsorbéru, 2 výstup vyčištěného plynu, 3 těleso adsorberu, 4 textilní filtr, 5 výstup adsorbentu, 6 jednotka regenerace adsorbentu, 7 vstup regeneračního média, 8 výstup plynů z regenerace, 9 dávkování adsorbentu, 10 odvod nevyhovujícího adsorbentu, 11 přívod nového adsorbentu. [1]



Obrázek 12 Proudový adsorbér [1]

Proudové adsorbéry kladou velké nároky na mechanické vlastnosti adsorbentu, zejména na disperzitu a pevnost částic. Tento druh adsorbéru se používá ve spalovnách odpadů, kde většinou nedochází k regeneraci. Adsorbát se vyjme a zalije do cementové směsi, která se uloží na skládku nebezpečného odpadu. [1]

1.4.2 ROZDĚLENÍ ADSORBÉRŮ PODLE UMÍSTĚNÍ LOŽE

- **Adsorbér s horizontálním ložem**

Plyn proudí přes adsorbent horizontálním směrem. Na obr. 13 je horizontální adsorbér vyrobený z polypropylenu.



Obrázek 13 Adsorbér s horizontálním ložem [14]

- **Adsorbér s vertikálním ložem**

Plyn proudí přes adsorbent vertikálním směrem. Na obr. 14 je vertikální adsorbér určený pro odstraňování olejových zbytků ze stlačeného vzduchu.



Obrázek 14 Adsorbér s vertikálním ložem [15]

2 PEVNOSTNÍ VÝPOČET PODLE ČSN EN 13445 – 3

V této kapitole je uveden pevnostní výpočet adsorbéru. Výpočet je proveden pro jednotlivé části zařízení dle normy ČSN EN 13445-3. Tato norma uvádí výpočtové vztahy pro netopené tlakové nádoby.

2.1 ZADANÁ VSTUPNÍ DATA

V tab. 1 jsou uvedeny údaje nezbytné k správnému návrhu a pevnostnímu výpočtu adsorbéru.

Pracovní médium	Zemní plyn - suchý
Odstraňovaná složka	H ₂ S - dočištění
Pracovní teplota	20 °C
Průtok média	2 100 m ³ /hod
Tlak média	2,4 MPa
Koncentrace H ₂ S na vstupu	40 mg/m ³
Koncentrace H ₂ S na výstupu	< 7 mg/m ³
Druh adsorbentu	Aktivní uhlí
Průměr adsorbéru	700 mm
Výška adsorbentu	2 000 mm
Hmotnost adsorbentu	330 kg
Délka válcové části adsorbéru	3 000 mm
Celková výška adsorbéru	asi 4 500 mm
Inertní materiál mezi porézní nosnou deskou a adsorbentem	Hliníkové koule (1/4“)
Výška inertního materiálu	100 mm

Tabulka 1 Důležité údaje pro výpočet adsorbéru.

V zadání bylo požadováno umístění přírub DN 50 každých 500 až 1000 mm po výšce adsorbentu. Tyto příruby budou složité k připojení měřicího zařízení, které bude monitorovat saturaci lože.

2.2 DOVOLENÉ NAPĚTÍ

Pro adsorbér byl zvolen materiál P265GH, který je určen pro tlakové nádoby a zařízení. Tento materiál je ve výrobě tlakových nádob hojně používán, což má za následek kratší dodací lhůty a přiměřenou cenu. Z tohoto materiálu bude vyroben válcový plášť a podstavec, torosférická dna, hrdla a příruby.

Základní charakteristiky materiálu P265GH jsou uvedeny v tab. 2. Hodnoty jsou pro teplotu 20 °C a maximální tloušťku polotovaru 40 mm.

Veličina	Značka	Hodnota [MPa]
Smluvní mez kluzu 0,2%	$R_{p0,2}$	255
Mez pevnosti v tahu	R_m	410
Smluvní mez kluzu 0,2% při teplotě 50 °C	$R_{p0,2/50}$	215

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti materiálu P265GH

Jelikož je tažnost materiálu P235GH menší než 30%, použije se pro výpočet dovoleného napětí následujících vztahů.

Dovolené namáhání pro provozní zatížení:

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/T}}{1,5}, \frac{R_{m/T}}{2,4}\right) = 170 \text{ MPa} \quad (1)$$

Dovolené namáhání při zkušebním zatížením:

$$f_{test} = \left(\frac{R_{p0,2/T_{test}}}{1,5}\right) = 204,7 \text{ MPa} \quad (2)$$

Pro šrouby na příruby byl zvolen korozivzdorný materiál 1.4401 s mezí pevnosti 600 MPa. Hodnoty f_B a f_{BA} jsou si rovné, protože provozní a montážní teplota je stejná.

$$f_B = f_{B,A} = \frac{R_{m,20}}{4} = 150 \text{ MPa} \quad (3)$$

2.3 ZKUŠEBNÍ TLAK A SVAROVÝ SOUČINITELE

Adsorbér je nutné zařadit do zkušební skupiny, která určuje rozsah a úroveň nedestruktivních zkoušek svarových spojů. Pro správné zařazení do zkušební skupiny je nutné určit řídící svar, což je v tomto případě podélný svar válcové skořepiny. Pro tento typ řídícího svaru je určená zkušební skupina číslo 3 a hodnota svarového součinitele je 0,85.

Zkušební skupina předepisuje provádět 100% vizuální kontrolu, kapilární zkoušku propustnosti minimálně na 10 % délky svaru a ultrazvukovou nebo prozařovací zkoušku minimálně na 10 % délky svaru.

Hodnota tlaku pro tlakovou zkoušku se určí ze vztahu:

$$P_{test} = \max \left[1,25 \cdot P \cdot \frac{t_{20}}{t_{TZ}}; 1,43 \cdot PS \right] = \max[3,2; 3,44] = 3,44 \text{ MPa} \quad (4)$$

Význam neznámých ve výpočtu tlaku při tlakové zkoušce je uveden v tab.3.

Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Provozní tlak	P	2,4	MPa
Teplota 20°C	t ₂₀	20	°C
Teplota při tlakové zkoušce	t _{TZ}	50	°C

Tabulka 3 Veličiny pro výpočet tlaku pro tlakovou zkoušku

2.3 VÁLCOVÁ SKOŘEPINA

V tab. 4 jsou uvedeny známé hodnoty vstupující do výpočtu.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Výpočtový tlak	P	2,40	MPa
Zkušební tlak	P _{test}	3,43	MPa
Vnitřní průměr skořepiny	D _i	700	mm
Dovolené napětí při provozu	f _d	170	MPa
Dovolené napětí při zkoušce	f _{test}	204,7	MPa
Svarový součinitel	z	0,85	-
Přídavek na korozi	c	2	mm
Absolutní hodnota možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce	δ _e	0,75	mm

Tabulka 4 Známé hodnoty vstupující do výpočtu válcové skořepiny

Vzorce pro výpočet minimální tloušťky stěny pro provozní podmínky.

$$e = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot f_d \cdot z - P} = 5,86 \text{ mm} \quad (5)$$

Analyzovaná tloušťka stěny e_a je 6 mm.

Jmenovitá tloušťka stěny se určí součtem analyzované tloušťky stěny, korozního přírůstku a absolutní hodnoty možné záporné tolerance na jmenovité tloušťce.

$$e_n = e_a + c + \delta_e = 10 \text{ mm} \quad (6)$$

Maximální dovolený tlak při provozu se vypočítá z analyzované tloušťky stěny a dovoleného namáhání pro provozní podmínky.

$$P_{max} = \frac{2 \cdot f_d \cdot z \cdot e_a}{D_m} = 2,46 \text{ MPa} \quad (7)$$

Maximální dovolený tlak při tlakové zkoušce se vypočítá ze jmenovité tloušťky stěny a dovoleného namáhání pro zkušební podmínky. Tlaková zkouška probíhá u nového zařízení, které není napadeno korozí. Korozní přídavek zde zvyšuje odolnost vůči tlaku.

$$P_{max,test} = \frac{2 \cdot f_{test} \cdot z \cdot (e_a + c)}{D_{m.test}} = 3,80 \text{ MPa} \quad (8)$$

Hodnoty maximálního dovoleného tlaku pro provozní i zkušební podmínky jsou vyšší než tlaky požadované. Geometrie pláště splňuje pevnostní požadavky.

V tab. 5 jsou uvedeny významné vypočtené hodnoty válcové skořepiny.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální tloušťka stěny při provozu	e	5,86	mm
Analyzovaná tloušťka stěny	e _a	5,86	mm
Jmenovitá tloušťka stěny	e _n	10	mm
Střední průměr skořepiny pro provoz	D _m	706	mm
Střední průměr skořepiny pro test	D _{m.test}	710	mm
Maximální tlak při provozu	P _{max}	2,46	MPa
Maximální tlak při zkoušce	P _{max.test}	3,80	MPa

Tabulka 5 Významné vypočtené hodnoty válcové skořepiny

2.4 TOROSFÉRICKÁ DNA

V tab. 6 jsou uvedeny známé hodnoty vstupující do výpočtu.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vnitřní průměr skořepiny	D_i	700	mm
Vnější průměr skořepiny	D_e	720	mm
Minimální tloušťka stěny při provozu	e	5,86	mm
Analyzovaná tloušťka stěny	$e_{a,d}$	6	mm
Vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu	r	119	mm
Vnitřní poloměr kulové střední části dna	R	630	mm
Vnitřní výška dna	h_i	175	mm
Součinitel tvaru - návrh	β	0,64	-
Součinitel tvaru - únosnost	β_{un}	0,58	-
Výpočtové napětí plastického boulení - provoz	f_b	170	MPa
Výpočtové napětí plastického boulení - test	$f_{b,test}$	205	MPa

Tabulka 6 Známé hodnoty vstupující do výpočtu dna

Norma uvádí následující podmínky platnosti, které zaručují správnost výpočtu.

$r \leq 0,2 \cdot D_i$	$119 \leq 140$	Splněno
$r \geq 0,06 \cdot D_i$	$119 \geq 42$	Splněno
$r \geq 2 \cdot e$	$119 \geq 11,8$	Splněno
$e \leq 0,08 \cdot D_e$	$5,9 \leq 57,6$	Splněno
$e_a \geq 0,001 \cdot D_e$	$6 \geq 0,72$	Splněno
$R \leq D_e$	$630 \leq 720$	Splněno
$1,7 < K < 2,2$	$1,7 < 2 < 2,2$	Splněno

Minimální požadovaná tloušťka stěny pro provozní podmínky se určí jako maximum z e_s , e_y a e_b .

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2 \cdot f_d \cdot z - 0,5 \cdot P} = 5,3 \text{ mm} \quad (9)$$

$$e_y = \frac{\beta \cdot P \cdot (0,75 \cdot R + 0,25 \cdot D_i)}{f_d} = 5,7 \text{ mm} \quad (10)$$

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,25 \cdot D_i) \left[\frac{P}{111 \cdot f_b} \cdot \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)} = 4,1 \text{ mm} \quad (11)$$

$$e_{min,d,provoz} = \max(e_s, e_y, e_b) = 5,7 \text{ mm} \quad (12)$$

Minimální požadovaná tloušťka stěny pro testovací podmínky se určí jako maximum z $e_{s,test}$, $e_{y,test}$ a $e_{b,test}$.

$$e_{s.test} = \frac{P_{test} \cdot R}{2 \cdot f_{test} \cdot z - 0,5 \cdot P_{test}} = 6,3 \text{ mm} \quad (13)$$

$$e_{y.test} = \frac{\beta \cdot P_{test} \cdot (0,75 \cdot R + 0,25 \cdot D_i)}{f_{test}} = 6,7 \text{ mm} \quad (14)$$

$$e_{b.test} = (0,75 \cdot R + 0,25 \cdot D_i) \left[\frac{P_{test}}{111 \cdot f_b} \cdot \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)} = 5,2 \text{ mm} \quad (15)$$

$$e_{min,d,test} = \max(e_{s,test}, e_{y,test}, e_{b,test}) = 6,7 \text{ mm} \quad (16)$$

$$e_{n,d} = \max(e_{a,d,test} + \delta_e, e_{a,d,provoz} + \delta_e + c) = 9,75 \text{ mm} \quad (17)$$

Po zaokrouhlení na výrobní rozměr je nominální tloušťka stěny dna $e_{n,d}$ rovna 10 mm.

Maximální dovolený tlak pro provozní podmínky se určí jako minimální hodnota z následujících výpočtů.

$$P_s = \frac{2 \cdot f_d \cdot z \cdot e_{min,d}}{R + 0,5 \cdot e_{min,d}} = 2,59 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$P_y = \frac{f_d \cdot e_{min,d}}{\beta_{un} \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)} = 2,71 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$P_{b.} = 111 \cdot f_b \cdot \left(\frac{e_{min,d}}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_i} \right)^{0,825} = 3,92 \text{ MPa} \quad (20)$$

$$P_{d,max,provoz} = \min(P_s, P_y, P_b) = 2,59 \text{ MPa} \quad (21)$$

Maximální dovolený tlak pro provozní podmínky se určí jako minimální hodnota z následujících výpočtů.

$$P_{s,test} = \frac{2 \cdot f_{test} \cdot z \cdot (e_{min,d} + c)}{R + 0,5 \cdot e_{a,d}} = 4,23 \text{ MPa} \quad (22)$$

$$P_{y.test} = \frac{f_{test} \cdot (e_{min,d} + c)}{\beta_{un} \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)} = 4,43 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$P_{b.test} = 111 \cdot f_{b.test} \cdot \left(\frac{e_{min,d} + c}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_i} \right)^{0,825} = 7,42 \text{ MPa} \quad (24)$$

$$P_{d,max.test} = \min(P_{s.test}, P_{y.test}, P_{b.test}) = 4,23 \text{ MPa} \quad (25)$$

Hodnoty maximálního dovoleného tlaku pro provozní i zkušební podmínky jsou vyšší než tlaky požadované. Geometrie dna splňuje pevnostní požadavky.

V tab. 7 jsou uvedeny maximální dovolené tlaky na torosférické dno.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Maximální tlak při provozu	$P_{d,max}$	2,59	MPa
Maximální tlak při zkoušce	$P_{d,max.test}$	4,23	MPa
Analyzovaná tloušťka stěny	$e_{a,d}$	7	mm

Tabulka 7 Maximální dovolený tlak na torosférické dno

2.5 OTVORY VE VÁLCOVÉM PLÁŠTI A TOROSFÉRICKÉM DNU

2.5.1 OTVORY V TOROSFÉRICKÉM DNĚ

Výpočet byl proveden pro nasazená hrdla.

V tab. 8 jsou uvedeny známé hodnoty vstupující do výpočtu otvoru v torosférickém dně.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vnitřní výška dna	h_i	175	mm
Vnitřní průměr skořepiny	D_i	700	mm
Vnější průměr skořepiny	D_e	720	mm
Předpokládaná tloušťka stěny skořepiny	$e_{c,s}$	7	mm
Analyzovaná tloušťka stěny skořepiny	e_{as}	7	mm
Vnitřní průměr hrdla ve skořepině	d_{ib}	152,3	mm
Vnější průměr hrdla ve skořepině	d_{eb}	168,3	mm
Délka skořepiny mezi okrajem otvoru a skořepinovou diskontinuitou	l_s	218	mm
Tloušťka stěny hrdla	$e_{b,h}$	8	mm
Délka vnější části hrdla	l_b	100	mm

Tabulka 8 Známé hodnoty vstupující do výpočtu otvoru ve dně

Podmínka pro otvory v klenutých dnech:

$$\frac{d_{eb}}{D_e} \leq 0,6 \qquad 0,233 \leq 0,6 \qquad \text{Splněno}$$

Vnitřní poloměr křivosti skořepiny v místě středu otvoru:

$$r_{is} = \frac{0,44 \cdot D_i^2}{2 \cdot h_i} + 0,02 \cdot D_i = 630 \text{ mm} \qquad (26)$$

Maximální vyztužující délka skořepiny:

$$l_{so} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} - e_{c,s}) \cdot e_{c,s}} = 93,7 \text{ mm} \quad (27)$$

Efektivní vyztužující délka skořepiny:

$$l'_s = \min(l_{so}, l_s) = 93,7 \text{ mm} \quad (28)$$

Maximální vyztužující délka vnější části hrdla:

$$l_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_{b,h}) \cdot e_{b,h}} = 35,8 \text{ mm} \quad (29)$$

Efektivní vyztužující délka vnější části hrdla:

$$l'_b = \min(l_{bo}, l_b) = 35,8 \text{ mm} \quad (30)$$

Výpočet dalších parametrů:

$$r_{ms} = (r_{is} + 0,5 \cdot e_{a,s}) = 633,5 \text{ mm} \quad (31)$$

$$\delta = \frac{d_{eb}}{2 \cdot r_{ms}} = 0,133 \quad (32)$$

$$a = r_{ms} \cdot \arcsin \delta = 84,4 \text{ mm} \quad (33)$$

Plocha skořepiny zatížená tlakem:

$$Ap_s = 0,5 \cdot r_{is}^2 \cdot \frac{l'_s + a}{0,5 \cdot e_{a,s} + r_{is}} = 55\,780 \text{ mm}^2 \quad (34)$$

Nosná plocha příčného průřezu hrdla účinná pro vyztužení:

$$Af_b = e_{b,h} \cdot l'_b = 286 \text{ mm}^2 \quad (35)$$

Nosná plocha příčného průřezu skořepiny účinná pro vyztužení:

$$Af_s = (l'_s + e_{b,h}) \cdot e_{c,s} = 711 \text{ mm}^2 \quad (36)$$

Plocha hrdla zatížená tlakem:

$$Ap_b = 0,5 \cdot d_{ib} \cdot (l'_b + e_{a,s}) = 3\,260 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

Maximální dovolený tlak pro provozní podmínky:

$$P_{h,max} = \frac{(Af_s + Af_b) \cdot f_d}{Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot (Af_s + Af_b)} = 2,85 \text{ MPa} \quad (38)$$

Maximální dovolený tlak pro testovací podmínky:

$$P_{max,test} = \frac{(Af_s + Af_b) \cdot f_{test}}{Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot (Af_s + Af_b)} = 3,5 \text{ MPa} \quad (39)$$

Hodnoty maximálního dovoleného tlaku pro provozní i zkušební podmínky jsou vyšší než tlaky požadované. Hrdlo v torosférickém dnu splňuje pevnostní požadavky.

V tab. 9 jsou uvedeny významné vypočtené hodnoty hrdla v torosférickém dně.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Maximální vyztužující délka skořepiny	l_{so}	93,7	mm
Plocha skořepiny zatížená tlakem	A_{ps}	55 780	mm ²
Nosná plocha příčného průřezu hrdla účinná pro vyztužení	A_{fb}	286	mm ²
Nosná plocha příčného průřezu skořepiny účinná pro vyztužení	A_{fs}	711	mm ²
Plocha hrdla zatížená tlakem	A_{pb}	3 260	mm ²
Maximální dovolený tlak pro provozní podmínky	$P_{h,max}$	2,85	MPa
Maximální dovolený tlak pro testovací podmínky	$P_{h,max,test}$	3,5	MPa

Tabulka 9 Významné vypočtené hodnoty hrdla v torosférickém dně

2.5.2 OTVORY VE VÁLCOVÉM PLÁŠTI

Výpočet byl proveden pro nasazená hrdla.

V tab. 10 jsou uvedeny známé hodnoty vstupující do výpočtu otvoru ve válcové skořepině.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr skořepiny	D_e	720	mm
Předpokládaná tloušťka stěny skořepiny	$e_{c,s}$	7	mm
Analyzovaná tloušťka stěny skořepiny	$e_{a,s}$	7	mm
Vnější průměr hrdla ve skořepině	d_{eb}	70	mm
Vnitřní průměr hrdla ve skořepině	d_{ib}	54,5	mm
Tloušťka stěny hrdla	$e_{b,h}$	7,75	mm
Délka skořepiny mezi okrajem otvoru a skořepinovou diskontinuitou	l_s	500	mm
Délka vnější části hrdla	l_b	80	mm

Tabulka 10 Známé hodnoty vstupující do výpočtu otvoru ve válcové skořepině

Určení parametru r_{is} :

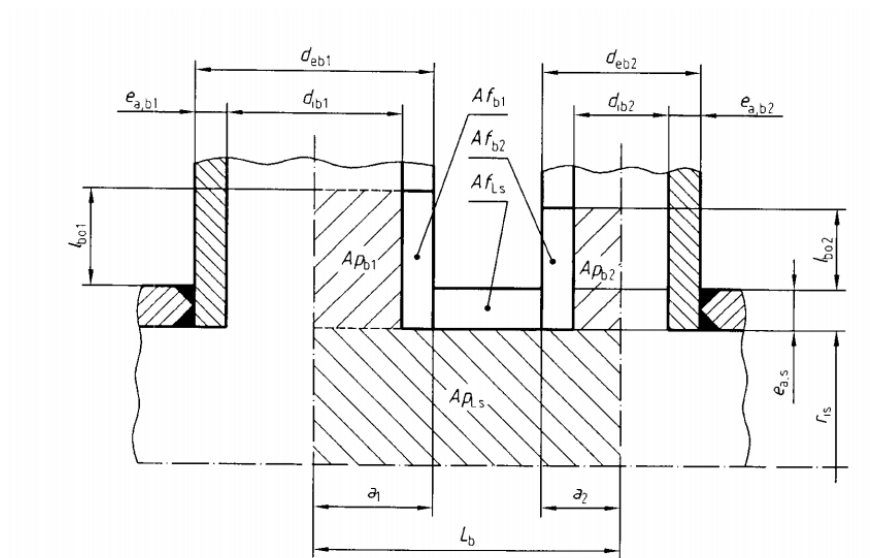
$$r_{is} = \frac{D_e}{2} - e_{a,s} = 353 \text{ mm} \quad (40)$$

Maximální vyztužující délky skořepiny:

$$l_{so1} = l_{so2} = \sqrt{(2 \cdot r_{is} + e_{c,s}) \cdot e_{c,s}} = 70,65 \text{ mm} \quad (41)$$

Vzdálenost středu otvoru a vnějšího hrdla měřená podél střednice skořepiny.

Na obr. 15 je náčrt, podle kterého byly určeny vzdálenosti a_1, a_2 .



Obrázek 15 Náčrt pro určení vzdálenosti a_1, a_2

$$a = a_1 = a_2 = \frac{d_{eb}}{2} = 35 \text{ mm} \quad (42)$$

Kontrola podmínky osamocení otvoru:

$$L_B \geq a_1 + a_2 + l_{so1} + l_{so2} \quad 500 \geq 212 \quad \text{Splněno}$$

Kontrola podmínky pro otvory ve válcové skořepině vyztužené hrdly:

$$\frac{d_{ib}}{2 \cdot r_{is}} \leq 1 \quad 0,08 \leq 1 \quad \text{Splněno}$$

Maximální vyztužující délka skořepiny:

$$l_{so} = \sqrt{(D_e - 2 \cdot e_{a,s}) \cdot e_{c,s}} = 70,65 \text{ mm} \quad (43)$$

Efektivní vyztužující délka skořepiny:

$$l'_s = \min(l_{so}, l_s) = 70,65 \text{ mm} \quad (44)$$

Maximální vyztužující délka vnější části hrdla:

$$l_{bo} = \sqrt{(d_{eb} - e_b) \cdot e_b} = 35,8 \text{ mm} \quad (45)$$

Efektivní vyztužující délka vnější části hrdla skořepiny:

$$l'_b = \min(l_{bo}, l_b) = 35,8 \text{ mm} \quad (46)$$

Plocha skořepiny zatížená tlakem:

$$A_{p_s} = r_{is} \cdot (l'_s + a) = 37\,290 \text{ mm}^2 \quad (47)$$

Nosná plocha příčného průřezu hrdla účinná pro vyztužení:

$$Af_b = e_b \cdot l'_b = 170 \text{ mm}^2 \quad (48)$$

Nosná plocha příčného průřezu skořepiny účinná pro vyztužení:

$$Af_s = (l'_s + e_b) \cdot e_{c,s} = 549 \text{ mm}^2 \quad (49)$$

Plocha hrdla zatížená tlakem:

$$Ap_b = 0,5 \cdot d_{ib} \cdot (l'_b + e_{a,s}) = 789 \text{ mm}^2 \quad (50)$$

Maximální dovolený tlak pro provozní podmínky:

$$P_{h2,max} = \frac{(Af_s + Af_b) \cdot f_d}{Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot (Af_s + Af_b)} = 3,18 \text{ MPa} \quad (51)$$

Maximální dovolený tlak pro testovací podmínky:

$$P_{h2,max,test} = \frac{(Af_s + Af_b) \cdot f_{test}}{Ap_s + Ap_b + 0,5 \cdot (Af_s + Af_b)} = 3,83 \text{ MPa} \quad (52)$$

Hodnoty maximálního dovoleného tlaku pro provozní i zkušební podmínky jsou vyšší než tlaky požadované. Hrdla ve válcovém plášti splňují pevnostní požadavky.

V tab. 11 jsou uvedeny významné vypočtené hodnoty hrdel ve válcovém plášti.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Maximální vyztužující délka skořepiny	l_{so}	70,65	mm
Plocha skořepiny zatížená tlakem	A_{ps}	37 290	mm ²
Nosná plocha příčného průřezu hrdla účinná pro vyztužení	A_{fb}	170	mm ²
Nosná plocha příčného průřezu skořepiny účinná pro vyztužení	A_{fs}	549	mm ²
Plocha hrdla zatížená tlakem	A_{pb}	789	mm ²
Maximální dovolený tlak pro provozní podmínky	$P_{h2,max}$	3,18	MPa
Maximální dovolený tlak pro testovací podmínky	$P_{h2,max,test}$	3,83	MPa

Tabulka 11 Významné vypočtené hodnoty hrdel ve válcovém plášti

2.6 PŘÍRUBY

2.6.1 PŘÍRUBY NA HRDLECH

Pro příruby na hrdlech byly použity standardně vyráběné příruby tlakové třídy PN 40. Tlaková třída PN 40 je nejbližší vyšší tlaková třída, která je v praxi standardně používána. Pokud příruby odpovídají evropským normám, není nutné provádět pevnostní výpočet. Evropský normám odpovídá například norma DIN 2635.

Pro hrdla na torosférickém dně byla použita přivařovací příruba s krkem DN 150, PN 40. Pro hrdla na válcovém plášti byly použita přivařovací příruba s krkem DN50, PN 40.

2.6.2 PLÁŠŤOVÁ PŘÍRUBA

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Tloušťka krku u spojení s pláštěm	g_0	7	mm
Tloušťka krku u spojení s listem příruby	g_1	37	mm
Minimální tloušťka příruby	e_p	50	mm
Délka krku příruby	h_p	30	mm
Vnější průměr příruby	A	900	mm
Vnitřní průměr příruby	B	720	mm
Průměr roztečné kružnice šroubů	C	820	mm
Jmenovitý průměr šroubu	d_n	30	mm
Minimální měrný tlak	y	2,8	MPa
Součinitel těsnění	m	1,25	-
Styková šířka těsnění	w	32	mm
Dovolené namáhání šroubů při provozní teplotě	f_B	150	MPa
Dovolené namáhání šroubů při provozní teplotě	$f_{B,A}$	150	MPa
Průměr působíště reakční síly v těsnění	G	767	mm
Výpočtový tlak	P	2,40	MPa
Zkušební tlak	P_{test}	3,43	MPa
Počet šroubů	n_s	28	-
Nosná plocha průřezu šroubu	A_s	511	mm ²
Rozteč šroubů na přírubě	δ_b	93	mm
Průměr díry pro šroub	d_b	33	mm

Základní šířka těsnění:

$$b_0 = \frac{w}{2} = 16 \text{ mm} \quad (53)$$

Účinná šířka těsnění:

$$b = 2,52 \cdot \sqrt{b_0} = 10 \text{ mm} \quad (54)$$

Celková osová síla od tlaku při provozních podmínkách:

$$H = \frac{\pi}{4} \cdot (G^2 \cdot P) = 1\,109\,000 \text{ N} \quad (55)$$

Tlaková síla na těsnění pro dosažení pevnosti při provozních podmínkách:

$$H_G = 2 \cdot \pi \cdot H \cdot b \cdot m \cdot P = 144\,600 \text{ N} \quad (56)$$

Minimální síla ve šroubech při montážních podmínkách:

$$W_A = \pi \cdot b \cdot G \cdot y = 67\,470 \text{ N} \quad (57)$$

Minimální síla ve šroubech při provozních podmínkách:

$$W_{op} = H + H_G = 1\,253\,000 \text{ N} \quad (58)$$

Požadovaná plocha průřezu šroubů pro provozní podmínky:

$$A_{B,min} = \max\left(\frac{W_A}{f_{B,A}}; \frac{W_{op}}{f_B}\right) = 8\,356 \text{ mm}^2 \quad (59)$$

Skutečná plocha průřezu šroubů:

$$A_B = n_s \cdot A_s = 14\,300 \text{ mm}^2 \quad (60)$$

Kontrola podmínky požadované plochy šroubů:

$$A_{B,min} \leq A_B \quad 8\,356 \leq 14\,300 \quad \text{Splněno}$$

Osová síla od tlaku přenášená přes plášť na přírubu:

$$H_D = \frac{\pi}{4} \cdot (B^2 \cdot P) = 97\,720 \text{ N} \quad (61)$$

Osová síla od tlaku na čelní plochu přírubu:

$$H_T = H - H_D = 131\,700 \text{ N} \quad (62)$$

Geometrické parametry příruby:

$$h_d = \frac{C - B - g_1}{2} = 31,5 \text{ mm} \quad (63)$$

$$h_G = \frac{C - G}{2} = 26,5 \text{ mm} \quad (64)$$

$$h_T = \frac{2C - B - G}{4} = 38,25 \text{ mm} \quad (65)$$

Konstrukční síla ve šroubech při montážních podmínkách:

$$W = 0,5 \cdot (A_{B,min} + A_B) \cdot f_{B,A} = 1\,699\,000 \text{ N} \quad (66)$$

Celkový moment na přírubu montážní podmínky:

$$M_A = W \cdot h_G = 4,503 \cdot 10^7 \text{ Nmm} \quad (67)$$

Celkový moment na přírubu provozní podmínky:

$$M_{op} = H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G = 3,965 \cdot 10^7 \text{ Nmm} \quad (68)$$

Korekční součinitel rozteče šroubů:

$$C_F = \max \left(\sqrt{\frac{\delta_b}{2 \cdot d_b + \frac{6 \cdot e_p}{m + 0,5}}}; 1 \right) = 1 \quad (69)$$

Poměr průměrů příruby:

$$K = \frac{A}{B} = 1,664 \quad (70)$$

Parametr délky:

$$l_o = \sqrt{B \cdot g_o} = 71 \text{ mm} \quad (71)$$

Určení součinitelů β :

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \log K) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1,818 \quad (72)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \log K) - 1}{1,36136(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 11,624 \quad (73)$$

$$\beta_V = \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left(0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \log K}{K^2 - 1} \right) = 8,83 \quad (74)$$

Napětí v přírubě pro montážní podmínky:

$$M_m = M_A \cdot \frac{C_F}{B} = 62\,540\,N \quad (75)$$

Napětí v přírubě pro provozní podmínky:

$$M_p = M_{op} \cdot \frac{C_F}{B} = 55\,070\,N \quad (76)$$

Koeficienty pro integrální metodu byly odečteny z grafů:

$$\beta_F = 0,85 \quad (77)$$

$$\beta_V = 0,19 \quad (78)$$

$$\varphi = 1 \quad (79)$$

Parametr λ :

$$\lambda = \left(\frac{e_p \cdot \beta_F + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{e_p^3 \cdot \beta_V}{\beta_U \cdot l_0 \cdot g_0^2} \right) = 1,466 \quad (80)$$

Podélné napětí v krku pro montážní podmínky:

$$\sigma_{H,m} = \frac{\varphi \cdot M_m}{\lambda \cdot g_1^2} = 31,15 \text{ MPa} \quad (81)$$

Podélné napětí v krku pro provozní podmínky:

$$\sigma_{H,p} = \frac{\varphi \cdot M_p}{\lambda \cdot g_1^2} = 27,43 \text{ MPa} \quad (82)$$

Radiální napětí v přírubě pro montážní podmínky:

$$\sigma_{r,m} = \frac{(1,333 \cdot e_p \cdot \beta_F \cdot l_0) \cdot M_m}{\lambda \cdot e_p^2 \cdot l_0} = 13,61 \text{ MPa} \quad (83)$$

Radiální napětí v přírubě pro provozní podmínky:

$$\sigma_{r,p} = \frac{(1,333 \cdot e_p \cdot \beta_F \cdot l_0) \cdot M_p}{\lambda \cdot e_p^2 \cdot l_0} = 11,98 \text{ MPa} \quad (84)$$

Tangenciální napětí v přírubě pro montážní podmínky:

$$\sigma_{\theta,m} = \frac{\beta_Y \cdot M_m}{e_p^2} - \sigma_r \cdot \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 158,87 \text{ MPa} \quad (85)$$

Tangenciální napětí v přírubě pro provozní podmínky:

$$\sigma_{\theta,p} = \frac{\beta_Y \cdot M_p}{e_p^2} - \sigma_r \cdot \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 139,89 \text{ MPa} \quad (86)$$

Jelikož je průměr adsorbéru menší než 1000 mm, je hodnota koeficientu $k = 1$. Zjištěná napětí se porovnají s dovoleným napětím vynásobeným koeficientem k .

Hodnoty napětí v přírubě

Při provozních podmínkách je vždy ve stejné kategorii vyšší montážní napětí. Proto se bude kontrolovat pouze montážní stav.

$k \cdot \sigma_{H,m} \leq 1,5 \cdot f_d$	$31,15 \leq 170$	Splněno
$k \cdot \sigma_{r,m} \leq f_d$	$13,61 \leq 170$	Splněno
$k \cdot \sigma_{\theta,m} \leq f_d$	$158,87 \leq 170$	Splněno
$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_{H,m} + \sigma_{r,m}) \leq f_d$	$22,38 \leq 170$	Splněno
$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_{H,m} + \sigma_{\theta,m}) \leq f_d$	$95,01 \leq 170$	Splněno

Při tlakové zkoušce je vždy ve stejné kategorii vyšší napětí od tlakové zkoušky, než napětí způsobené montáží. Proto se bude kontrolovat “provozní“ napětí. Výpočet napětí je uveden v příloze této práce.

$k \cdot \sigma_{H.test,p} \leq 1,5 \cdot f_d$	$39,31 \leq 307$	Splněno
$k \cdot \sigma_{r.test,p} \leq f_d$	$17,18 \leq 205$	Splněno
$k \cdot \sigma_{\theta.test,p} \leq f_d$	$200,50 \leq 205$	Splněno
$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_{H.test,p} + \sigma_{r.test,p}) \leq f_d$	$28,25 \leq 170$	Splněno
$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_{H.test,p} + \sigma_{\theta.test,p}) \leq f_d$	$83,66 \leq 170$	Splněno

V tab.12 jsou uvedeny napětí v plášťové přírubě pro provoz i tlakovou zkoušku.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Podélné napětí v krku pro montážní podmínky - provoz	$\sigma_{H,m}$	31,15	MPa
Podélné napětí v krku pro provozní podmínky - provoz	$\sigma_{H,p}$	27,43	MPa
Radiální napětí v přírubě pro montážní podmínky - provoz	$\sigma_{r,m}$	13,61	MPa
Radiální napětí v přírubě pro provozní podmínky - provoz	$\sigma_{r,p}$	11,98	MPa
Tangenciální napětí v přírubě pro montážní podmínky -provoz	$\sigma_{\theta,m}$	158,87	MPa
Tangenciální napětí v přírubě pro provozní podmínky -provoz	$\sigma_{\theta,p}$	139,89	MPa
Podélné napětí v krku pro montážní podmínky – tlaková zk.	$\sigma_{H.test,m}$	31,15	MPa
Podélné napětí v krku pro provozní podmínky - tlaková zk.	$\sigma_{H.test,p}$	27,43	MPa
Radiální napětí v přírubě pro montážní podmínky - tlaková zk.	$\sigma_{r.test,m}$	13,61	MPa
Radiální napětí v přírubě pro provozní podmínky - tlaková zk.	$\sigma_{r.test,p}$	11,98	MPa
Tangenciální napětí v přírubě pro montážní podmínky - tlaková zk.	$\sigma_{\theta.test,m}$	158,87	MPa
Tangenciální napětí v přírubě pro provozní podmínky - tlaková zk.	$\sigma_{\theta.test,p}$	139,89	MPa

Tabulka 12 Napětí v krkové přírubě

2.7 VÁLCOVÝ PODSTAVEC

V tab. 13 jsou uvedeny známé hodnoty vstupující do výpočtu válcového podstavce.

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Střední poloměr podstavce	D_Z	352,5	mm
Vnitřní poloměr skořepiny	D_B	355	mm
Tloušťka stěny nádoby	e_B	7	mm
Tloušťka stěny podstavce	e_Z	5	mm
Tíha nádoby bez obsahu	F_G	6 669	N
Tíha nádoby pod řezem 2-2	ΔF_G	785	N
Tíha obsahu	F_F	3 236	N
Celková globální přídavná síla	F_1	0	N
Celkový globální přídavný moment	M_1	0	N
Dovolené namáhání materiálu podstavce	f_{pod}	176	MPa
Vnitřní poloměr křivosti anuloidového přechodu	r	119	mm

Tabulka 13 Geometrie a zatížení válcového podstavce

Celková globální přídavná síla a celkový globální přídavný moment jsou nulové, protože ze zadání nelze určit další přídavná zatížení. Přídavná zatížení mohou být například: síly a momenty od potrubních tras, zatížení konstrukce větrem a sněhem a mnoho dalších zatížení.

Nejvyšší ekvivalentní tahová síla v podstavci způsobená globálním momentem:

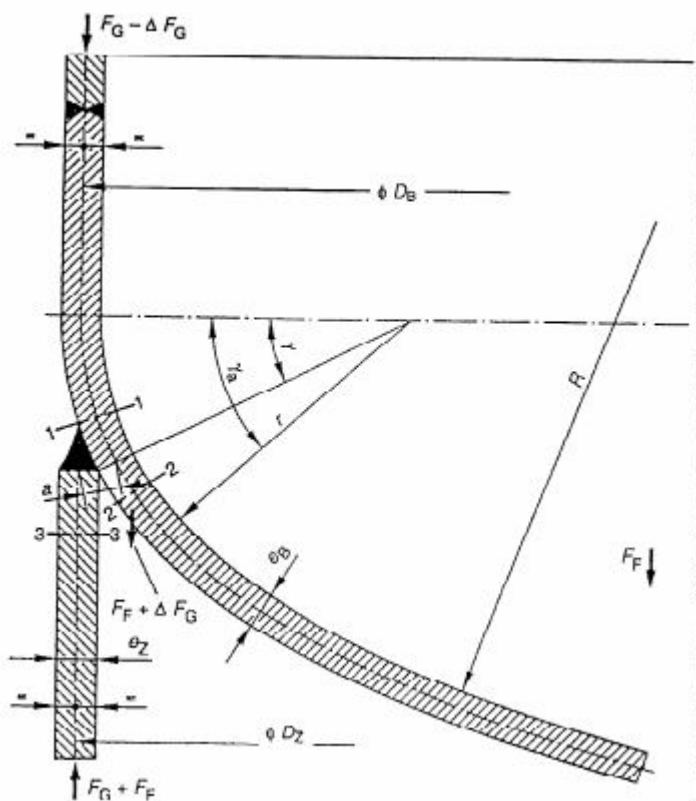
$$F_{Zp} = -F_1 - F_G - F_F + 4 \cdot \frac{M_1}{D_Z} = -9\,905 \text{ N} \quad (87)$$

Nejvyšší ekvivalentní tlaková síla v podstavci způsobená globálním momentem:

$$F_{Zp} = -F_1 - F_G - F_F - 4 \cdot \frac{M_1}{D_Z} = -9\,905\,N \quad (88)$$

Membránová napětí

Na obr. 16 je znázorněno spojení podstavce s tlakovou nádobu, kde jsou zobrazeny řezy a rozměry na které se následující výpočet odvolává.



Obrázek 16 Válcový podstavec

Napětí v bodě 1-1:

$$\sigma_{1p}^m = \frac{F_{Zp} + \Delta F_G + F_F}{\pi \cdot D_B \cdot e_B} + \frac{P \cdot D_B}{4 \cdot e_B} = 29,68\,MPa \quad (89)$$

$$\sigma_{1q}^m = \frac{F_{Zq} + \Delta F_G + F_F}{\pi \cdot D_B \cdot e_B} + \frac{P \cdot D_B}{4 \cdot e_B} = 29,68 \text{ MPa} \quad (90)$$

Minimální tloušťka stěny podstavce v bodě 1-1:

$$e_{1p}^m = \frac{1}{f_{pod}} \cdot \left(\frac{F_{Zp} + \Delta F_G + F_F}{\pi \cdot D_B} + \frac{P \cdot D_B}{4} \right) = 1,18 \text{ mm} \quad (91)$$

$$e_{1q}^m = \frac{1}{f_{pod}} \cdot \left(\frac{F_{Zq} + \Delta F_G + F_F}{\pi \cdot D_B} + \frac{P \cdot D_B}{4} \right) = 1,18 \text{ mm} \quad (92)$$

Napětí v bodě 2-2

$$\sigma_{2q}^m = \sigma_{2p}^m = \frac{F_F + \Delta F_G}{\pi \cdot D_B \cdot e_B} + \frac{P \cdot D_B}{4 \cdot e_B} = 30,94 \text{ MPa} \quad (93)$$

Minimální tloušťka stěny podstavce v bodě 2-2

$$e_2^m = \frac{1}{f_{pod}} \cdot \left(\frac{F_F + \Delta F_G}{\pi \cdot D_B} + \frac{P \cdot D_B}{4} \right) = 1,23 \text{ mm} \quad (94)$$

Napětí v bodě 3-3

$$\sigma_{3p}^m = \frac{F_{zp}}{\pi \cdot D_z \cdot e_z} = -1,79 \text{ MPa} \quad (95)$$

$$\sigma_{3q}^m = \frac{F_{zq}}{\pi \cdot D_z \cdot e_z} = -1,79 \text{ MPa} \quad (96)$$

Minimální tloušťka stěny podstavce v bodě 3-3

$$e_{3p}^m = \frac{1}{f_{pod}} \cdot \left(\frac{F_{zp}}{\pi \cdot D_z} \right) = 0,06 \text{ mm} \quad (97)$$

$$e_{3q}^m = \frac{1}{f_{pod}} \cdot \left(\frac{F_{zq}}{\pi \cdot D_z} \right) = 0,06 \text{ mm} \quad (98)$$

V tab. 14 je provedeno porovnání membránových napětí s dovoleným napětím.

Membránové napětí	Hodnota membránového napětí [MPa]	Dovolené napětí materiálu f_{pod} [MPa]	Podmínka: $f_{pod} \geq \sigma^m$
σ_{1p}^m	29,68	176	Splněno
σ_{1q}^m	29,68	176	Splněno
σ_{2q}^m	30,94	176	Splněno
σ_{2p}^m	30,94	176	Splněno
σ_{3p}^m	-1,79	176	Splněno
σ_{3q}^m	-1,79	176	Splněno

Tabulka 14 Porovnání membránového a dovoleného napětí

V tab. 15 je provedeno porovnání vypočítaných tloušťek stěny podstavce s tloušťkou analyzovanou.

Tloušťka stěny	Hodnota tloušťky stěny e^m [mm]	Analyzovaná tloušťka stěny $e_{a,p}$ [mm]	Podmínka: $e_{a,p} \geq e^m$
e_{1p}^m	1,18	5	Splněno
e_{1q}^m	1,18	5	Splněno
e_2^m	1,23	5	Splněno
e_{3p}^m	0,06	5	Splněno
e_{3q}^m	0,06	5	Splněno

Tabulka 15 Porovnání vypočítané a analyzované tloušťky stěny

Cosinus části úhlu anuloidového přechodu:

$$\cos(\gamma) = 1 - \frac{D_B + e_B - D_Z + e_Z}{2 \cdot (r + e_B)} = 0,942 \quad (99)$$

Rameno sil od předsazení kolmice stěny skořepiny:

$$a = 0,5 \cdot \sqrt{e_B^2 + e_Z^2 + 2 \cdot e_B \cdot e_Z \cdot \cos(\gamma)} = 5,92 \text{ mm} \quad (100)$$

Excentricita a střednice stěny skořepiny vyvolává ohybový moment:

$$M_p = a \cdot F_{Zp} = -58\,590 \text{ Nmm} \quad (101)$$

$$M_q = a \cdot F_{Zq} = -58\,590 \text{ Nmm} \quad (102)$$

Podmínka platnosti pro korekční součinitel C:

$$0,5 \leq \frac{e_B}{e_Z} \leq 2,25 \quad 0,5 \leq 1,4 \leq 2,25 \quad \text{Splněno}$$

Korekční součinitel C:

$$C = 0,63 - 0,057 \cdot \left(\frac{e_B}{e_Z}\right)^2 = 0,518 \quad (103)$$

Ohybová napětí v řezech 1-1, 2-2 a 3-3 na vnějším povrchu:

$$\sigma_{1p}^b(a) = \sigma_{2p}^b(a) = C \cdot \frac{6 \cdot M_p}{\pi \cdot D_B \cdot e_B^2} = -3,34 \text{ MPa} \quad (104)$$

$$\sigma_{1q}^b(a) = \sigma_{2q}^b(a) = C \cdot \frac{6 \cdot M_q}{\pi \cdot D_B \cdot e_B^2} = -3,34 \text{ MPa} \quad (105)$$

$$\sigma_{3p}^b(a) = C \cdot \frac{6 \cdot M_p}{\pi \cdot D_Z \cdot e_Z^2} = -6,58 \text{ MPa} \quad (106)$$

$$\sigma_{3q}^b(a) = C \cdot \frac{6 \cdot M_q}{\pi \cdot D_Z \cdot e_Z^2} = -6,58 \text{ MPa} \quad (107)$$

Parametry y a α :

$$y = \frac{125 \cdot e_b}{D_B} = 2,465 \quad (108)$$

$$\alpha = 4,2 - 0,2 \cdot y = 3,707 \quad (109)$$

Ohybová napětí způsobena vnitřním tlakem na anuloidový přechod:

$$\sigma_1^b(p) = \sigma_2^b(p) = \frac{(P + P_H \cdot D_B)}{4 \cdot e_B} \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_a} \cdot \alpha - 1\right) = -29,40 \text{ MPa} \quad (110)$$

Celková napětí v bodě p, řezu 1-1:

$$\sigma_{1pi}^{tot} = \sigma_{1p}^m - \sigma_{1p}^b(a) + \sigma_1^b(p) = 3,61 \text{ MPa} \quad (111)$$

$$\sigma_{1po}^{tot} = \sigma_{1p}^m + \sigma_{1p}^b(a) - \sigma_1^b(p) = 55,74 \text{ MPa} \quad (112)$$

Celková napětí v bodě q, řezu 2-2:

$$\sigma_{2qi}^{tot} = \sigma_{2q}^m + \sigma_{2q}^b(a) + \sigma_2^b(p) = -1,79 \text{ MPa} \quad (113)$$

$$\sigma_{2qo}^{tot} = \sigma_{2q}^m - \sigma_{2q}^b(a) - \sigma_2^b(p) = 63,67 \text{ MPa} \quad (114)$$

Celková napětí v bodě p, řezu 3-3:

$$\sigma_{3pi}^{tot} = \sigma_{3p}^m - \sigma_{3p}^b = 4,79 \text{ MPa} \quad (115)$$

$$\sigma_{3po}^{tot} = \sigma_{3p}^m + \sigma_{3p}^b = -8,37 \text{ MPa} \quad (116)$$

Celková napětí v bodě q, řezu 3-3

$$\sigma_{3qi}^{tot} = \sigma_{3q}^m - \sigma_{3q}^b = 4,79 \text{ MPa} \quad (117)$$

$$\sigma_{3qo}^{tot} = \sigma_{3q}^m + \sigma_{3q}^b = -8,37 \text{ MPa} \quad (118)$$

V případě tvárného materiálu musí celková napětí vyhovovat následujícím vzorcům:

Řez 1-1

$\sigma_{1pi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1p}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$3,61 \leq 524,66$	Splněno
$\sigma_{1pi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1p}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$55,74 \leq 524,66$	Splněno
$\sigma_{1qi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1q}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$3,61 \leq 524,66$	Splněno
$\sigma_{1qo}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{1q}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$55,74 \leq 524,66$	Splněno

Řez 2-2

$\sigma_{2pi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2p}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$-1,79 \leq 524,38$	Splněno
$\sigma_{2pi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2p}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$63,67 \leq 524,66$	Splněno
$\sigma_{2qi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2q}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$-1,79 \leq 524,38$	Splněno
$\sigma_{2qo}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2q}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$63,67 \leq 524,66$	Splněno

Řez 3-3

$\sigma_{2pi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2p}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$-1,79 \leq 524,38$	Splněno
$\sigma_{2pi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2p}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$63,67 \leq 524,66$	Splněno
$\sigma_{2qi}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2q}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$-1,79 \leq 524,38$	Splněno
$\sigma_{2qo}^{tot} \leq f_{pod} \cdot \left[3 - \frac{1}{1,5} \cdot \left(\frac{\sigma_{2q}^m}{f_{pod}} \right)^2 \right]$	$63,67 \leq 524,66$	Splněno

Válcový podstavec s analyzovanou tloušťkou 5 mm vyhověl všem pevnostním požadavkům.

3 PEVNOSTNÍ KONTROLA POMOCÍ MKP

3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda používána k zjištění průběhu napětí, deformace, elektromagnetismu, vlastní frekvence a dalších jevů. Ačkoliv se počátky metody objevily již v roce 1941, k jejímu rozšíření došlo až s rozvojem výpočetní techniky. [14]

Princip MKP

Základní princip metody konečných prvků spočívá v rozdělení tělesa na menší části. Na jednotlivých prvcích lze poměrně jednoduše popsat napětí a zobecněné posuvy. Celou metodu lze rozdělit na tyto kroky:

1) Rozdělení tělesa na jednotlivé elementy

Těleso se rozdělí na určitý počet elementů. Na kvalitě a počtu elementů je silně závislá přesnost výpočtu.

2) Formulace chování elementu

U elementu jsou matematicky popsány posuvy a přetvoření. Pro popis se používá zápis rovnic v maticovém tvaru.

3) Aplikace okrajových či počátečních podmínek

Na těleso se aplikují zátěžné a vazebné okrajové podmínky. Chybné zadání okrajových podmínek může vést k naprosto nesprávným výsledkům.

4) Vlastní řešení systému rovnic

V napětí-ově-deformační analýze pružných těles je základním funkcionál energie napjatosti. Energetický funkcionál lze popsat rovnicí 119.

$$\Pi = W - P \quad (119)$$

kde:

Πpotenciální energie těles [J]

Wnapjatost v tělese [J]

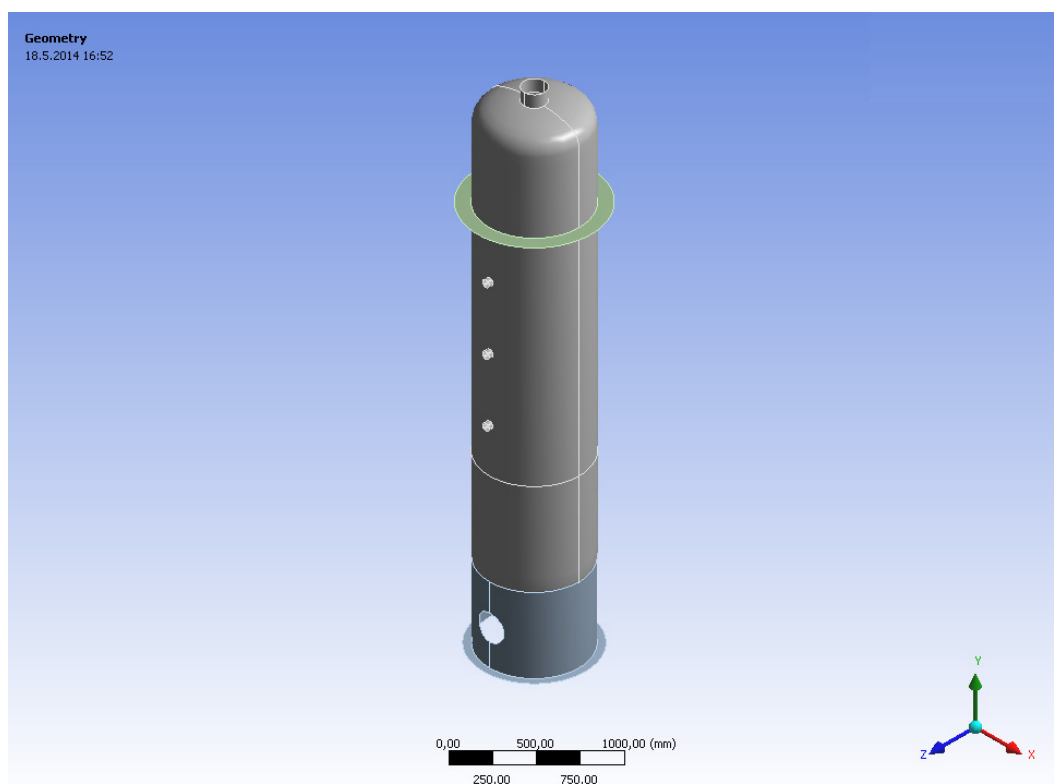
Ppotenciál vnějšího zatížení [J] [14]

3.2 VÝPOČET PLOŠNÉHO MODELU ADSORBÉRU

Pevnostní analýza byla provedena v softwaru ANSYS Workbench 13.0.

3.2.1 MODEL

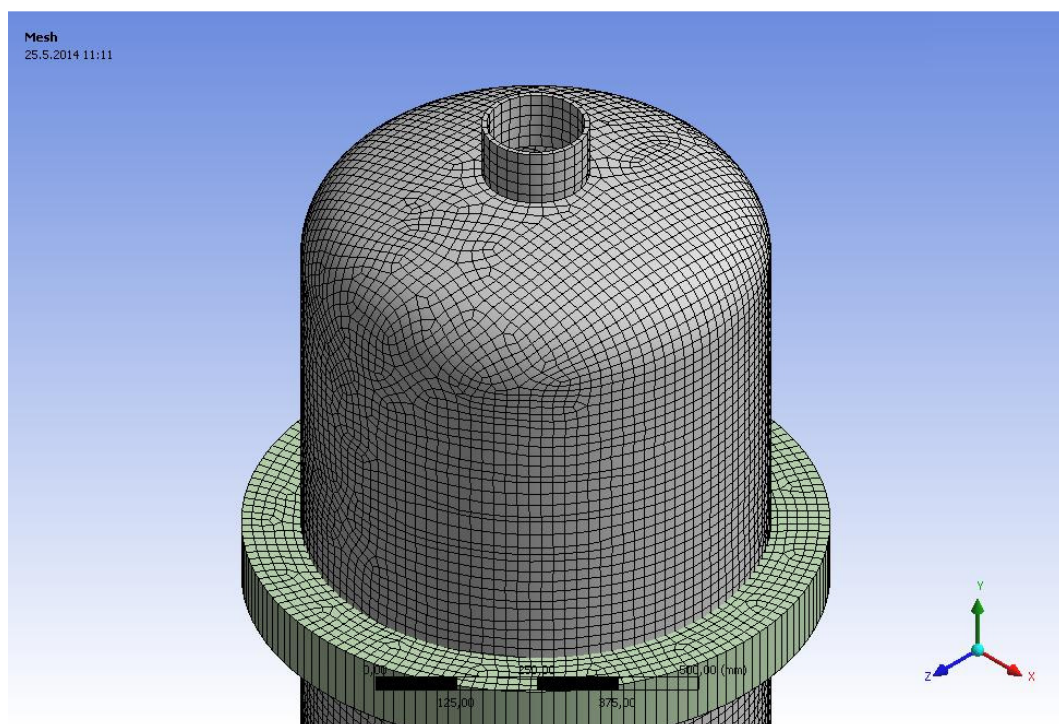
Na obr. 17 je znázorněn model adsorbéru, vytvořen v programu SolidWorks od společnosti Dassault Systèmes. Model byl vytvořen pomocí ploch, z důvodu nižší výpočtové náročnosti.



Obrázek 17 Plošný model adsorbéru

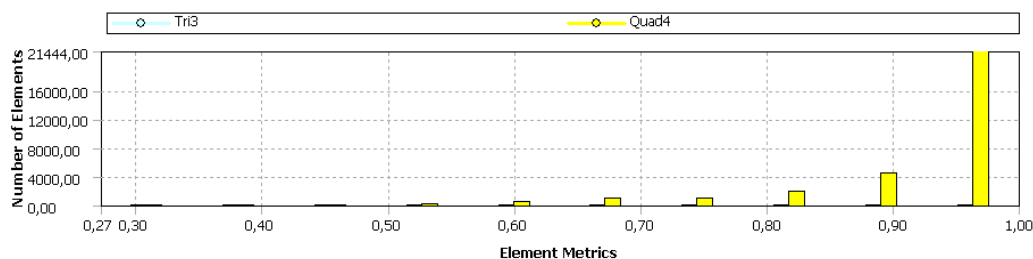
3.2.2 TVORBA SÍTĚ

Na tělese byla vytvořena síť metodou “*Quadrilateral Dominant*“. Tato metoda primárně vytváří prvky tvaru čtyřúhelníku, pouze pokud tohoto tvaru dosáhnout nelze, vytvoří se element trojúhelníkového tvaru. Maximální velikost elementu je 0,5 mm. Na obr. xy je zobrazen detail sítě na horní části adsorbéru.



Obrázek 18 Detail sítě na plošném modelu

Na obrázku XY je znázorněna kvalita sítě, kde na svislé ose je uveden počet elementů a na vodorovné ose je uveden poměr délek stran elementů. Sloupce žluté barvy označují čtyřúhelníky, sloupce modré barvy označují trojúhelníky. Z obrázku je patrné, že elementy tvaru trojúhelníku jsou v zanedbatelném počtu.

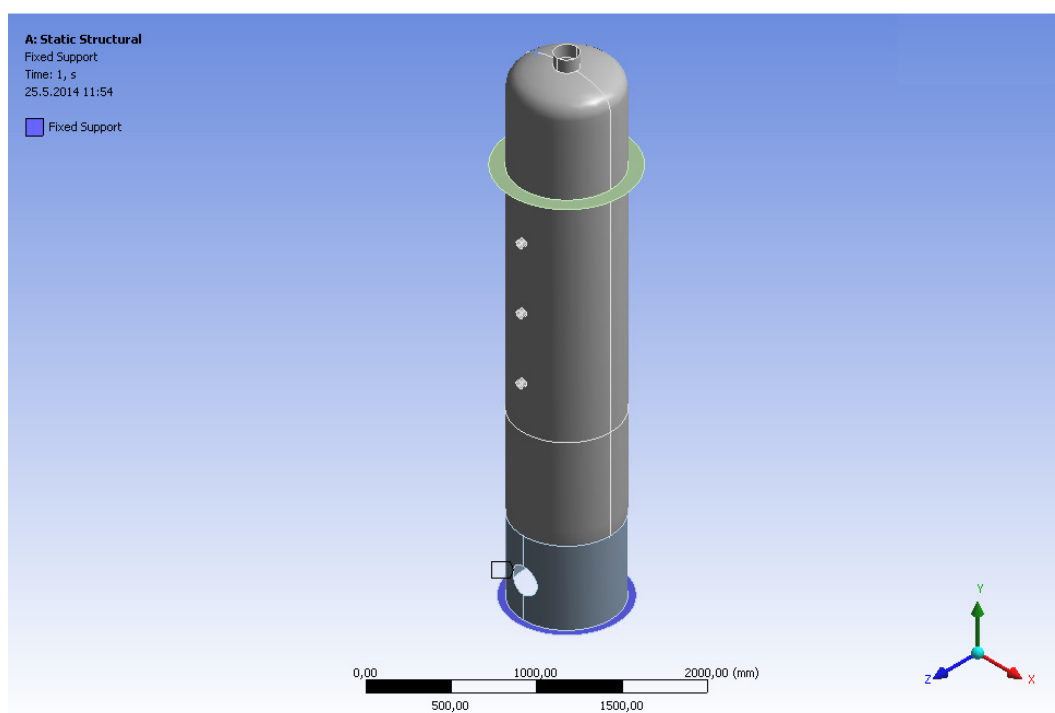


Obrázek 19 Vizualizace kvality sítě

3.2.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Vazebné

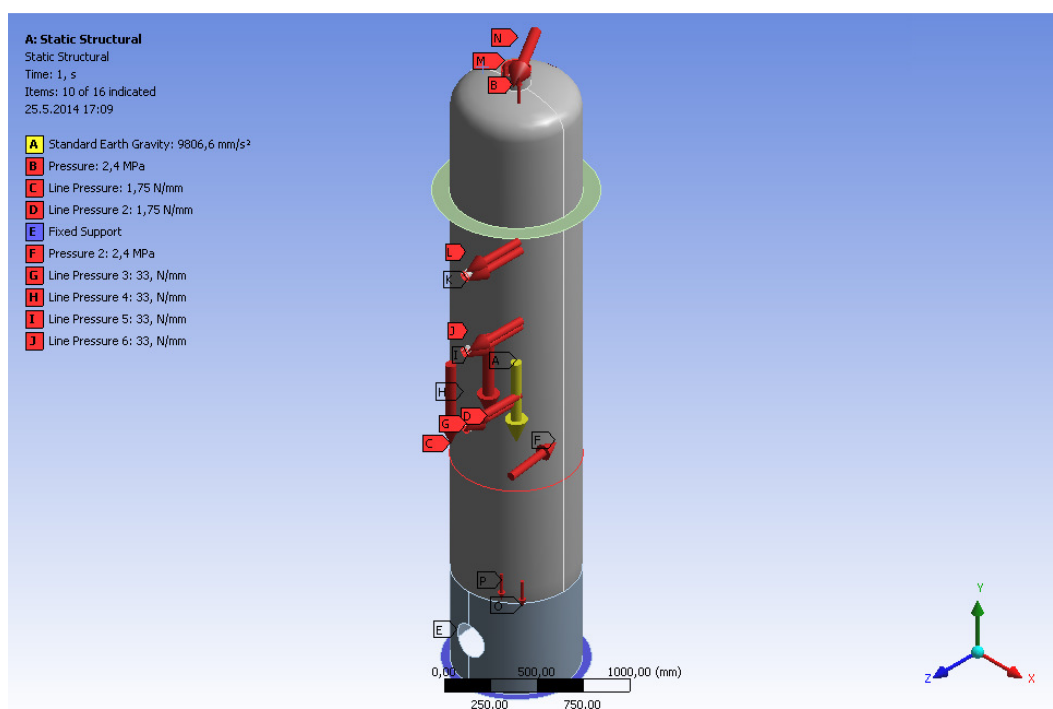
Na prstenec podstavce byla použita vazba “*Fixed Support*” (obr. 20), která zamezí pohybu ve všech směrech.



Obrázek 20 Okrajové vazebné podmínky na plošném modelu

Zátěžné

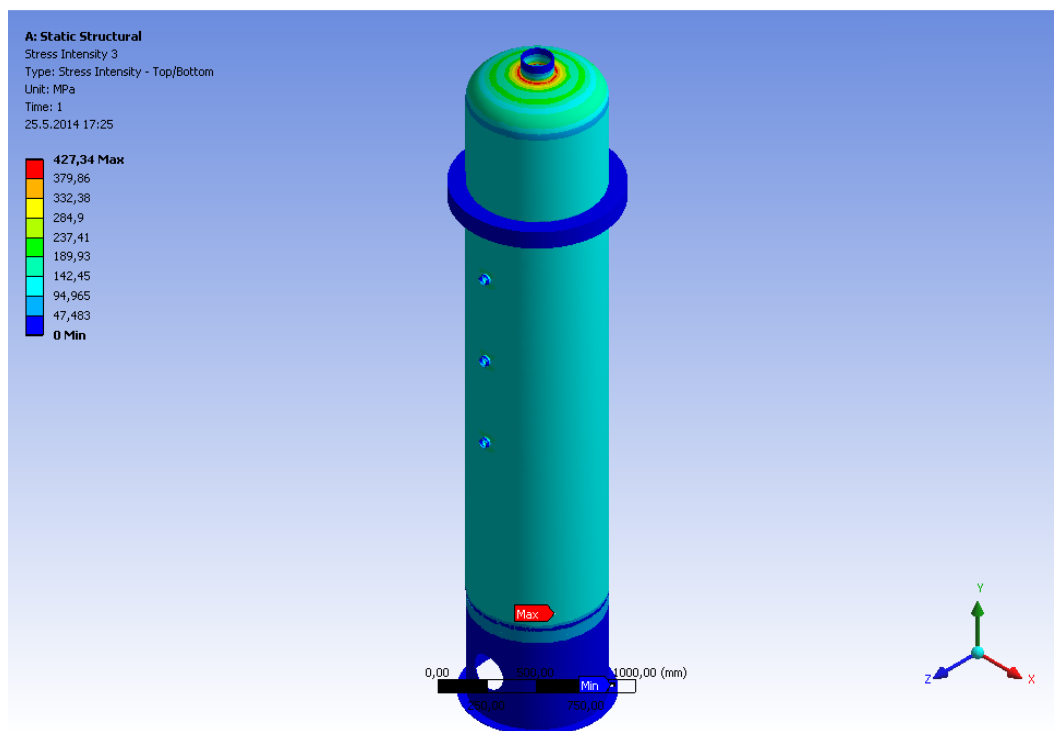
Vnitřní plochy byly zatíženy tlakem 2,4 MPa. Plochy hrdel byly zatíženy liniovou silou, která je vyvolána tlakem působícím na přírubu. Liniová síla působí směrem ven z nádoby. Liniová síla působící na hrdla ve dnech je 96 N/mm, síla působící na hrdla v plášti je 33 N/mm. Plášť adsorbéru byl zatížen liniovou silou, kterou vyvolává hmotnost náplně adsorbéru. Hodnota síly od hmotnosti náplně je 1,75 N/mm. Dále byla celá konstrukce zatížena tíhovou silou od vlastní hmotnosti. Při výpočtu provedeném pro testovací podmínky je tlak na vnitřní plochy 3,44 MPa, síla na hrdla umístěna ve dnech je 137 N/mm a síla na hrdla v plášti je 55 N/mm. Pro případ tlakové zkoušky je adsorbér zatížen hydrostatickým tlakem. Na obr. 21 jsou zobrazeny vazebné a zátěžné okrajové podmínky pro provozní zatížení.



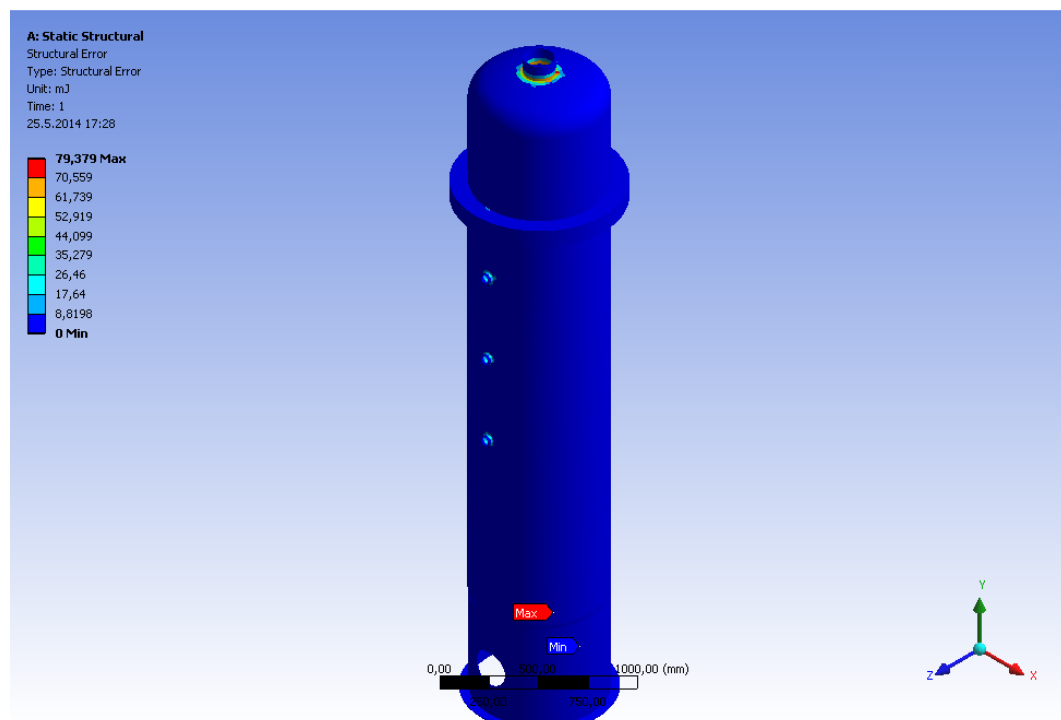
Obrázek 21 Vazebné a zátěžné podmínky pro provozní podmínky

3.2.4 VÝSLEDKY VÝPOČTU

Na obr. 22 je intenzita napětí při provozních podmínkách. Hodnota dovoleného napětí je přesáhnuta v oblasti hrdel a obou den adsorbéru. Na obr. 23 jsou zobrazeny oblasti, v nichž je výsledek zatížen výraznou chybou. Tyto oblasti se vyskytují především ve spojení hrdel s pláštěm. Jelikož vysoké hodnoty napětí bylo dosaženo v oblasti torosférických den, byla provedena detailní analýza této části.



Obrázek 22 Rozložení napětí při provozních podmínkách



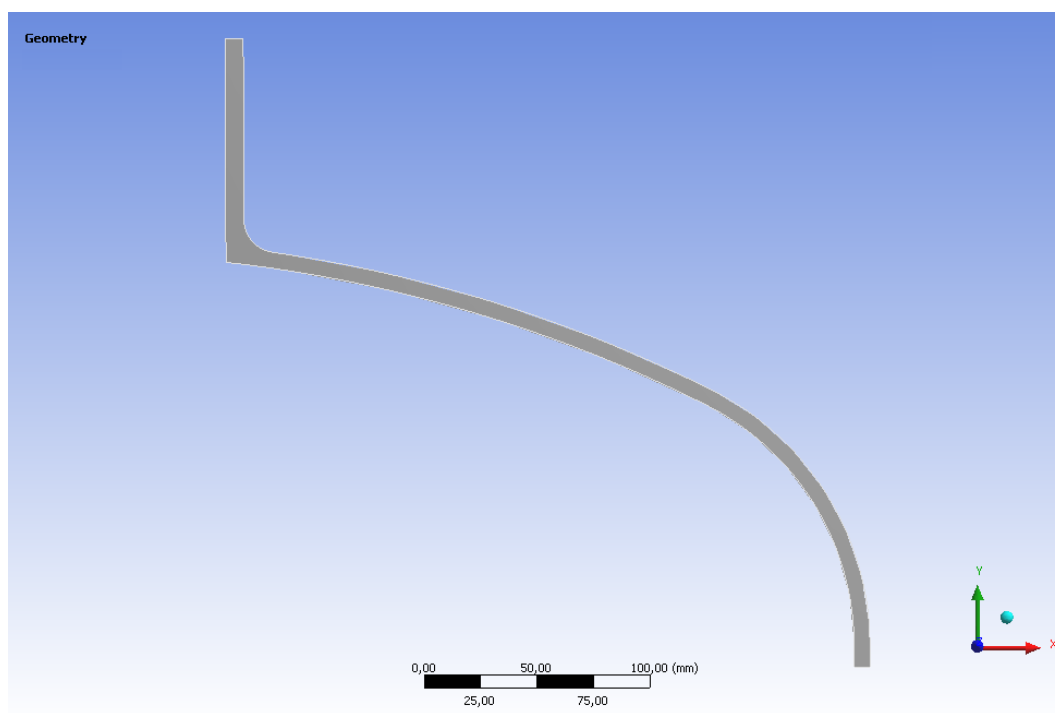
Obrázek 23 Oblasti zatížené chybou výpočtu

3.3 DETAILNÍ VÝPOČET DNA S HRDLEM

Výpočet dna byl proveden pomocí 2D analýzy s využitím rotační symetrie. Tento druh výpočtu umožňuje dosažení kvalitní sítě a rychlejšího výpočtu.

3.3.1 MODEL

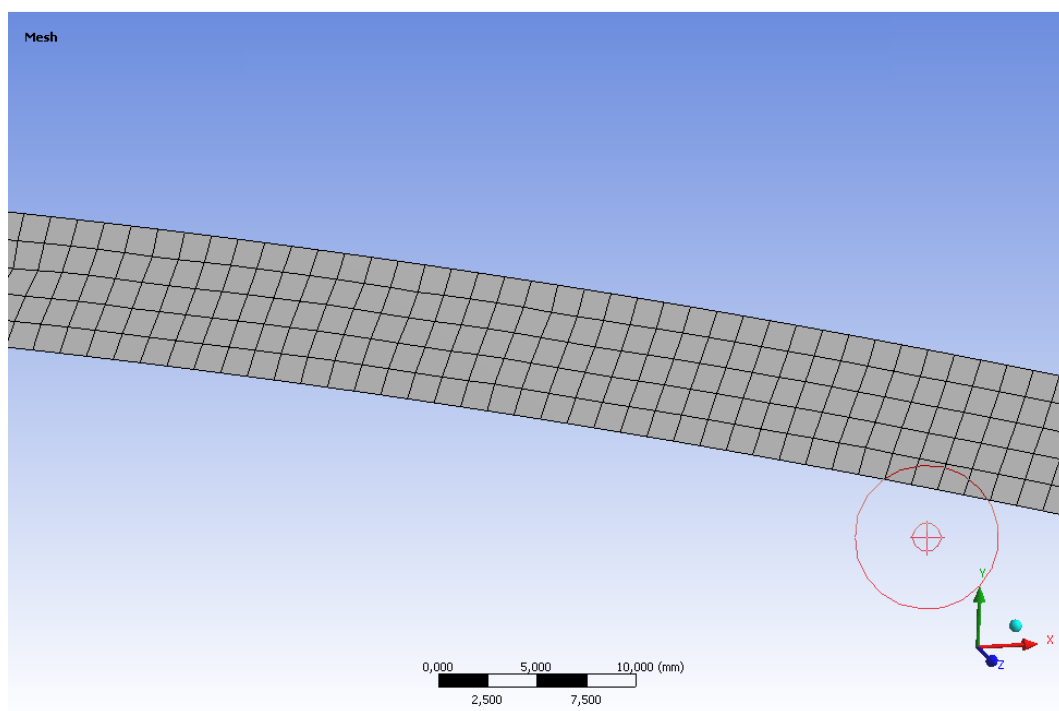
Pro výpočet byl vytvořen 2D model v programu SolidWorks. Model zahrnuje hrdlo, torosférické dno a válcovou část. Model je na obr. 24.



Obrázek 24 Model torosférického dna s hrdlem

3.3.2 TVORBA SÍŤE

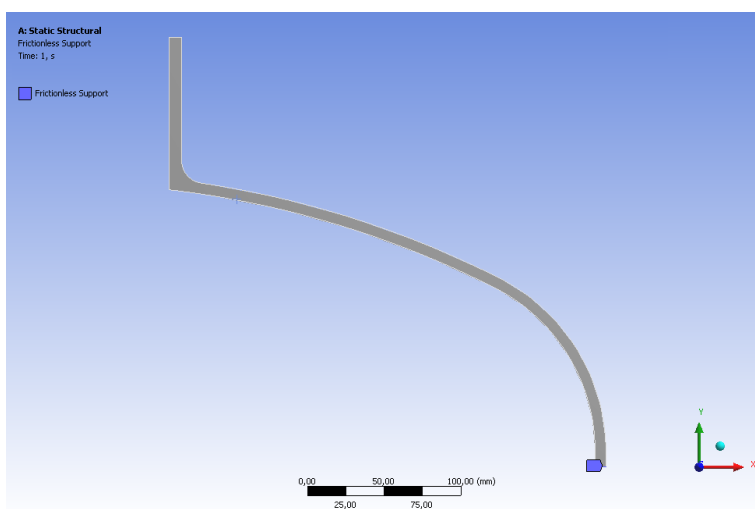
Na obr. 25 je znázorněna síť na 2D modelu.



Obrázek 25 Síť na 2D modelu

3.3.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Vazebné

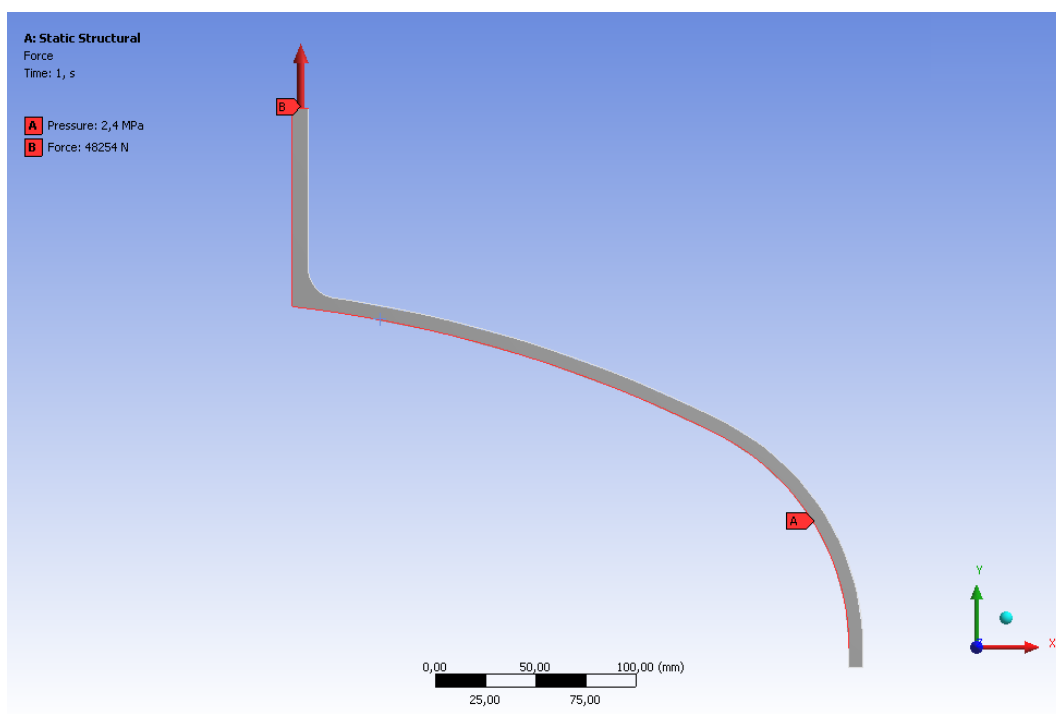


Na spodní plochu válcové části byla použita vazba “*Frictionless Support*” (obr. 26). U této vazby jsou normálové posuvy uzlů vůči dané rovině nulové, ostatní jsou volné. Model se pohybuje po rovině bez tření.

Obrázek 26 Okrajové podmínky pro 2D model

Zátěžné

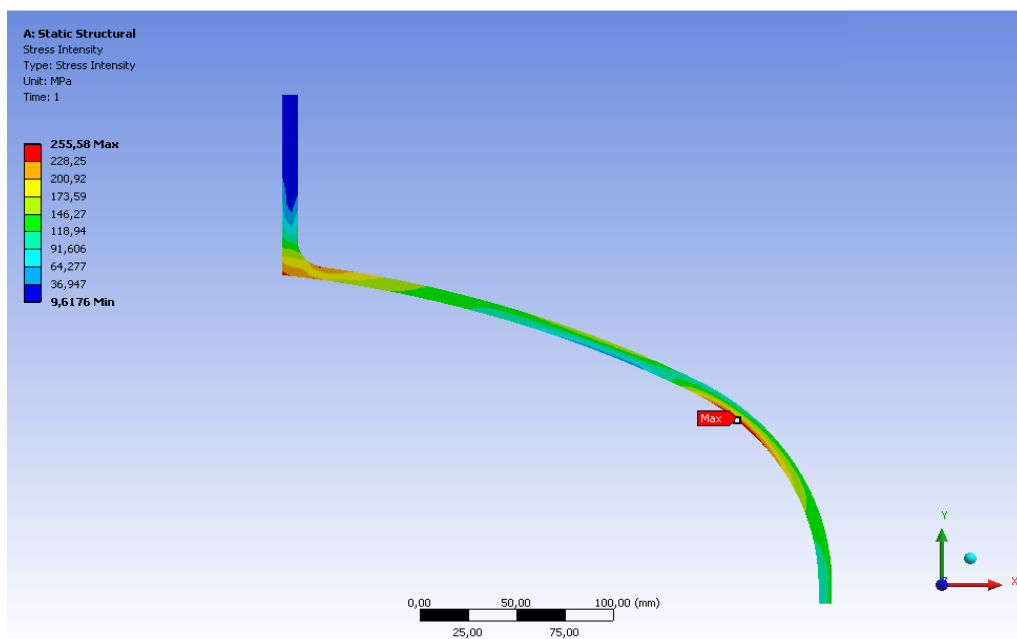
Vnitřní plochy byly zatíženy tlakem 2,4 MPa. Plochy hrdel byly zatíženy silou, která je vyvolána tlakem působícím na přírubu. Síla o velikosti 48 254 N působí směrem ven z nádoby (obr. 27). Pro tlakovou zkoušku je tlak 3,44 MPa, síla 69 165 N a byl přidán hydrostatický tlak.



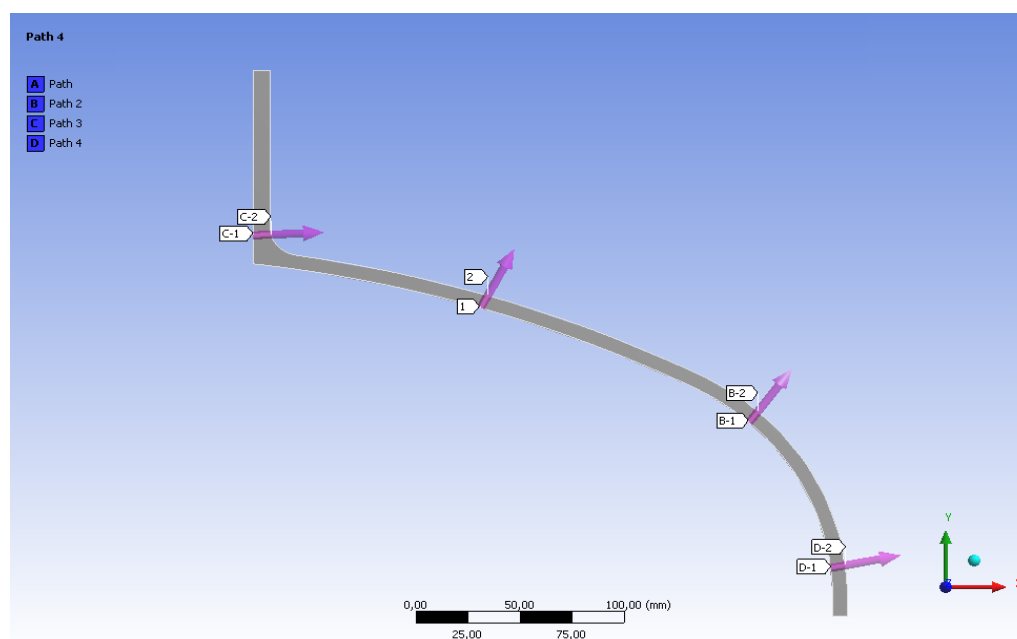
Obrázek 27 Okrajové zátěžné podmínky pro 2D model

3.3.4 VÝSLEDKY VÝPOČTU

Na obr. 28 je zobrazen průběh napětí. Pro posouzení bylo použito kategorizace napětí. Na obrázku 29 jsou zobrazeny přímky linearizace. Přímka B-B je v místě nejvyššího napětí. Ostatní přímky byly umístěny tak, aby popsaly napětí v celé oblasti hrdla.



Obrázek 28 Intenzita napětí na 2D modelu



Obrázek 29 Přímky linearizace na 2D modelu

Kategorizace napětí

Vypočtená napětí se klasifikují na primární, sekundární a špičkové. Ke každé kategorii je přiřazeno určité dovolené napětí. Primární napětí se dále rozděluje na:

- globální primární membránové napětí (P_m)
- lokální primární membránové napětí (P_L)
- primární ohybové napětí (P_b) [16]

Pro konstrukční zatížení stanovuje norma limity pro daná ekvivalentní napětí:

$$(\sigma_{eq})_{Pm} \geq f_d$$

$$(\sigma_{eq})_{PL} \geq 1,5 \cdot f_d$$

$$(\sigma_{eq})_P \geq 1,5 \cdot f_d$$

Kde:

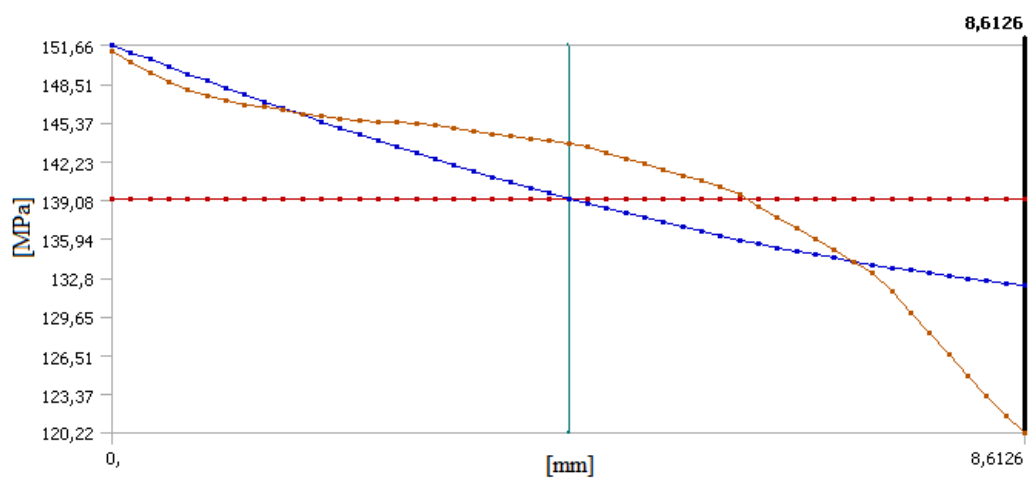
$(\sigma_{eq})_{Pm}$ - ekvivalentní primární membránové napětí

$(\sigma_{eq})_{PL}$ - ekvivalentní lokální membránové napětí

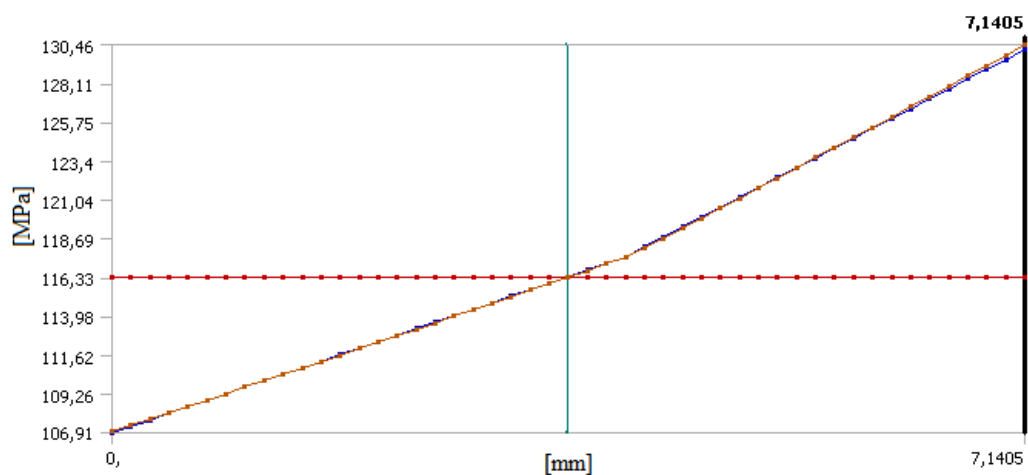
$(\sigma_{eq})_P$ - ekvivalentní celkové primární napětí (součet globálního nebo lokálního primárního membránového napětí a primárního ohybového napětí) [16]

Průběhy napětí po délce úseček

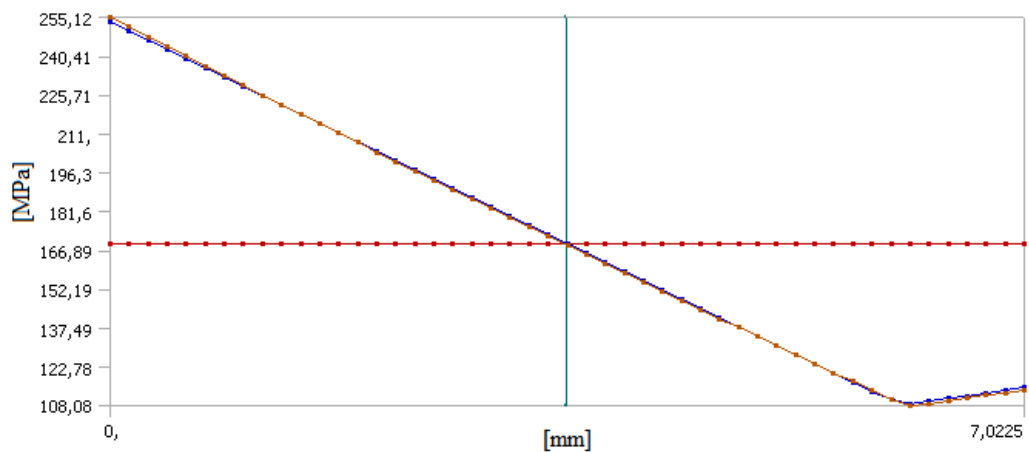
Na obr. 30 až 33 jsou zobrazeny průběhy napětí po jednotlivých úsečkách z obr. 29.



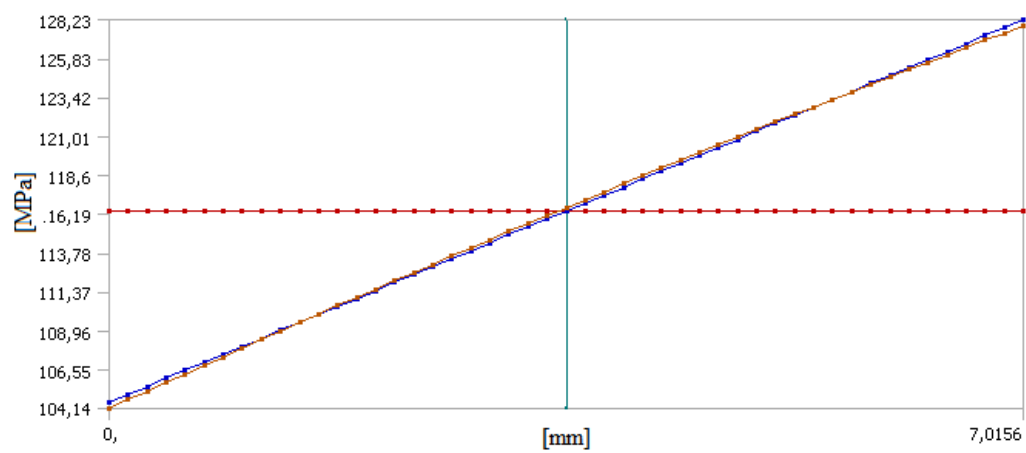
Obrázek 30 Průběh napětí po úsečce C1-C2 při provozních podmínkách



Obrázek 31 Průběh napětí po úsečce 1-2 při provozních podmínkách



Obrázek 32 Průběh napětí po úsečce B1-B2 při provozních podmínkách



Obrázek 33 Průběh napětí po úsečce D1-D2 při provozních podmínkách

V tab.16 je porovnání vypočítaného a dovoleného napětí.

Úsečka	Označení	Vypočítané napětí [MPa]	Dovolené napětí f_d [MPa]	Podmínka: $f_d \geq (\sigma_{eq})_x$
1-2	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	117	170	Splněno
	$(\sigma_{eq})_P$	130	255	Splněno
B1-B2	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	167	170	Splněno
	$(\sigma_{eq})_P$	253	255	Splněno
C1-C2	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	140	170	Splněno
	$(\sigma_{eq})_P$	151	255	Splněno
D1-D2	$(\sigma_{eq})_{Pm}$	116	170	Splněno
	$(\sigma_{eq})_P$	128	255	Splněno

Tabulka 16 Porovnání vypočteného a dovoleného napětí

ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámit se s problematikou adsorpce a navrhnout konstrukci adsorbéru. Pevnostní výpočet byl řešen analyticky a také pomocí numerické výpočetní metody.

Úvodní část diplomové práce se věnovala základnímu popisu děje adsorpce. Byla popsána fyzikální podstata a konstrukční řešení aparátů.

Dále byl proveden analytický výpočet podle normy ČSN EN 13 445 – 3. Nejprve se určilo dovolené napětí pro provozní podmínky a tlakovou zkoušku. Byla stanovena zkušební skupiny a posléze také hodnota svarového součinitele. Dle normy byly vypočítány minimální tloušťky stěny u válcového pláště, torosférických dnů a válcového podstavce. Následně se tloušťky stěn ověřily kontrolním výpočtem. Kontrolní výpočet potvrdil správnost navržené geometrie.

V případě válcového podstavce byly zahrnuty do výpočtu síly od tíhy vlastní hmotnosti a hmotnosti náplně. Nebylo uvažováno s přídatným zatížením, jako jsou síly a momenty od potrubních tras, větru, seizmicity a dalších. Avšak analyzovaná tloušťka je násobně větší než minimální požadovaná tloušťka stěny.

V poslední části byly provedeny pevnostní analýzy v softwaru ANSYS Workbench. Analýza plošného modelu byla provedena s cílem zjistit slabé místo na konstrukci. Nejvyšší napětí bylo ve spojení hrdla s pláštěm, ale to je způsobeno ostrým napojením střednice. Dalším místem s výrazným napětím byly obě torosférické dna. Proto byla tato část analyzována pomocí osově symetrické 2D úlohy. Po vykreslení průběhu napětí, byly zkonstruovány úsečky linearizace. Jedna úsečka byla zakreslena do místa nejvyššího napětí, ostatní rovnoměrně po celé ploše tělesa. Následně byla provedena kategorizace napětí a porovnání s dovoleným napětím.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RICHTER, Miroslav. Technologie ochrany životního prostředí: Technologie ochrany ovzduší. Ústí nad Labem, 2004. Dostupné z: http://www.fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/tezp/tezp2.pdf. Učební text. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. L.
- [2] BARTOVSKÁ, Lída a Marie ŠÍŠKOVÁ. „Co je co v povrchové a koloidní chemii“. Praha, 2005. Dostupné z: http://www.fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/tezp/tezp2.pdf. Studijní opora. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- [3] WYPYCH, George. Handbook of solvents. New York: ChemTec, 2001, xxix, 1675 p. ISBN 08-155-1458-1.
- [4] THOMAS, W a B CRITTENDEN. Adsorption technology and design. Boston: Butterworth-Heinemann, 1998, x, 271 p. ISBN 07-506-1959-7.
- [5] SILCARBON AKTIVKOHLE GMBH. Silcarbon: aktivkohle [online]. 2010 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://web.telecom.cz/silcarbon/vseobecně.html>
- [6] BASF THE CHEMICAL COMPANY. Activated Bentonite [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.catalysts.basf.com/p02/USWeb-Internet/catalysts/en/content/microsites/catalysts/prods-inds/adsorbents/act-bent-adsorb>
- [7] BASF THE CHEMICAL COMPANY. Activated Alumina Adsorbents [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.catalysts.basf.com/p02/USWeb-Internet/catalysts/en/content/microsites/catalysts/prods-inds/adsorbents/act-alum-adsorb>
- [8] SILCARBON AKTIVOHLE. Silikagel [online]. 2010 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://web.telecom.cz/silcarbon/přehled_typů.html
- [9] BASF THE CHEMICAL COMPANY. Molecular Sieve Adsorbents [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.catalysts.basf.com/p02/USWeb-Internet/catalysts/en/content/microsites/catalysts/prods-inds/adsorbents/mole-sieve-adsorb>

- [10] BASF THE CHEMICAL COMPANY. Metal Oxide Purification Adsorbents [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.catalysts.basf.com/p02/USWeb-Internet/catalysts/en/content/microsites/catalysts/prods-inds/adsorbents/met-oxide-pur-adsorb>
- [11] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Praha, 2002. Dostupné z: www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/skriptaOOaCOP/1-86.doc. Studijní opora. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- [12] VYBÍRAL, Pavel. Omezování plyných emisí. Praha, 2010. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Ochrana%20ovzduši/Omezovani%20plynných%20emisi.pdf>. Studijní opora. České vysoké učení technické v Praze.
- [13] KLIMA-SERVICE A.S. Filtrační patrony KS KOPA s aktivním uhlím [online]. Dobříš, 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.ksklimaservice.cz/cz/filtracni-patrony-ks-kopa-s-aktivnim-uhlim>
- [14] AVT, s.r.o. Plastový absorbér výplňový horizontální VA 22/2-PP-H [online]. Hradec Králové, 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.avthk.cz/plastovy-absorber-vyplnovy-horizontalni-va-22-2-pp-h.html>
- [15] INDIAMART. Activated Carbon Adsorber [online]. USA, 2012 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.indiamart.com/coburg-equipments/products.html>
- [16] ČSN EN 13 345-3. Netopené tlakové nádoby. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.
- [17] FUSEK, Martin a Radim HALAMA. MKP a MHP. Ostrava, Plzeň, 2011. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1</i> Možné průběhy adsorpčních izoterm [4]	16
<i>Obrázek 2</i> Adsorpční hystereze [2]	17
<i>Obrázek 3</i> Průběh izoterm při různých tvarech pórů [2]	18
<i>Obrázek 4</i> Kazety obsahující aktivní uhlí [13]	19
<i>Obrázek 5</i> Aktivní uhlí [5]	20
<i>Obrázek 6</i> Jíl [6]	21
<i>Obrázek 7</i> Silikagel [8]	21
<i>Obrázek 8</i> Zeolity [9]	22
<i>Obrázek 9</i> Oxidy kovů [10]	22
<i>Obrázek 10</i> Aktivovaný oxid hlinitý [7]	23
<i>Obrázek 11</i> Adsorbér s fluidním ložem [12]	25
<i>Obrázek 12</i> Proudový adsorbér [1]	26
<i>Obrázek 13</i> Adsorbér s horizontálním ložem [14]	27
<i>Obrázek 14</i> Adsorbér s vertikálním ložem [15]	27
<i>Obrázek 15</i> Nákres pro určení vzdálenosti a_1 , a_2	41
<i>Obrázek 16</i> Válcový podstavec	55
<i>Obrázek 17</i> Plošný model adsorbéru	64
<i>Obrázek 18</i> Detail sítě na plošném modelu	65
<i>Obrázek 19</i> Vizualizace kvality sítě	65
<i>Obrázek 20</i> Okrajové vazebné podmínky na plošném modelu	66

Obrázek 21 Vazebné a zátěžné podmínky pro provozní podmínky	67
Obrázek 22 Rozložení napětí při provozních podmínkách	68
Obrázek 23 Oblasti zatížené chybou výpočtu	69
Obrázek 24 Model torosférického dna s hrdlem	70
Obrázek 25 Síť na 2D modelu	71
Obrázek 26 Okrajové podmínky pro 2D model	71
Obrázek 27 Okrajové zátěžné podmínky pro 2D model	72
Obrázek 28 Intenzita napětí na 2D modelu	73
Obrázek 29 Přímký linearizace na 2D modelu	73
Obrázek 30 Průběh napětí po úsečce C1-C2 při provozních podmínkách	75
Obrázek 31 Průběh napětí po úsečce 1-2 při provozních podmínkách	75
Obrázek 32 Průběh napětí po úsečce B1-B2 při provozních podmínkách	76
Obrázek 33 Průběh napětí po úsečce D1-D2 při provozních podmínkách	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Důležité údaje pro výpočet adsorbéru.....	28
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti materiálu P265GH.....	29
Tabulka 3 Veličiny pro výpočet tlaku pro tlakovou zkoušku	30
Tabulka 4 Známé hodnoty vstupující do výpočtu válcové skořepiny.....	31
Tabulka 5 Významné vypočtené hodnoty válcové skořepiny.....	32
Tabulka 6 Známé hodnoty vstupující do výpočtu dna	33
Tabulka 7 Maximální dovolený tlak na torosférické dno	36
Tabulka 8 Známé hodnoty vstupující do výpočtu otvoru ve dně.....	37
Tabulka 9 Významné vypočtené hodnoty hrdla v torosférickém dně.....	40
Tabulka 10 Známé hodnoty vstupující do výpočtu otvoru ve válcové skořepině.....	40
Tabulka 11 Významné vypočtené hodnoty hrdel ve válcovém plášti.....	44
Tabulka 12 Napětí v krkové přírubě	53
Tabulka 13 Geometrie a zatížení válcového podstavce	54
Tabulka 14 Porovnání membránového a dovoleného napětí	57
Tabulka 15 Porovnání vypočítané a analyzované tloušťky stěny	58
Tabulka 16 Porovnání vypočteného a dovoleného napětí.....	77

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronická verze na CD

Výpočet v programu Mathcad na CD

Výkres adsorbéru